

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**Metody predikce životnosti v konstrukci  
tvářecích nástrojů**

Methods of Life Prediction in Forming Tools Design

Disertační práce

Studijní program:	P2346 Strojní inženýrství
Obor:	Strojírenská technologie
Školitel:	prof. Ing. Hrubý Jiří, CSc.
Doktorand:	Ing. Rentka Josef

Ostrava 2015

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat panu prof. Ing. Jiřímu Hrubému, CSc. za odborné vedení práce, náměty a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat.

V Ostravě:

## ANOTACE

Doktorská práce pojednává o možnostech predikce životnosti nástrojů. Na začátku mapuje aktuální situaci v této problematice, existují různé přístupy jak zjišťovat životnost nástrojů. V tomto dokumentu se zaměřuje autor na porovnání numerického modelu s reálným procesem tváření. Protože problematika životnosti při tvářecích procesech je velice široká, zaměřil se autor pouze na základní technologii tváření, a to tváření za studena. Je navržen experiment, který byl porovnán s reálným procesem. Při návrhu experimentu bylo využito experimentálního lisu ZD 40 s numerickým řízením a sběrem dat. Lis umožňuje provádět jak tahové, tak i tlakové zkoušky. Experiment v reálném provozu by byl velmi drahý pro svou časovou náročnost.

Experiment proběhl pro dva druhy nástrojových materiálů a dva druhy tvářených materiálů. Vhodnou kombinací všech materiálů tak vznikly dvě sady nástrojů a tvářených materiálů, které se zkoušely. Jedna zkušební sada se skládala ze dvou desek (nástroje) a několika špalíčků (vzorků). Tyto vzorky se lisovaly za studena na lisu, který byl spojen s PC. Po odlisování 10 vzorků, byly změřeny nástroje v místě expozice. Měření probíhalo na délkoměru MAHR. Získané údaje bylo třeba korigovat (jsou představeny dvě možnosti přístupu). Z korigovaných dat vyplynuly úbytky povrchu - opotřebení. Průnikem změřených dat a dat z numerického modelu byla přijata základní premisa opotřebení. Jako vedlejší produkt práce byly porovnány teploty dosahované během procesu tváření a konfrontovány s numerickým modelem. Teploty byly měřeny bezdotykovou metodou pomocí termovizní kamery. Rozdíly mezi numerickými modely (různé verze výpočetního programu) a reálnými procesy byly osvětleny. Během experimentu byly nástroje také změřeny pomocí přístroje pro měření intenzit magnetického pole. To samo o sobě není účelné pro tuto práci. Zařízení je však schopno detekce vad pod povrchem, čímž není potřeba technologií, jako je rentgen a ultrazvuk, pro detekci různých anomálií. Z výsledků tohoto měření lze odvodit stav nástrojů.

Klíčová slova:

Opotřebení, životnost tvářecích nástrojů, korekce měření úbytků, numerický model, měření intenzit magnetického pole, termovizní měření teploty, MKP

## ANNOTATION

The dissertation thesis addresses the prediction possibilities of tool life. The beginning of the thesis surveys the current situation of the issues; there are various approaches to investigate the tool life. In this document, the author focuses on the comparison of the numerical model with the real forming operation. Since the issue of the durability in forming operations is very wide, the author focused only on the basic forming technology, i.e. cold forming. The experiment, which was compared to the real operation, was upsetting. While drawing the experiment up, was used experimental press the ZD 40 with numerical driving and collecting dates. The press allows the performance of both tensile and compression tests. The experiment in the actual operations would be very expensive due to the fact that it is time-consuming.

The experiment was performed for two types of tool materials and two types of formed materials. Through the appropriate combination of all materials, two sets of tools and formed materials were made; they were subject to testing. One test set comprised two plates (tools) and several blocks (samples). The blocks were cold pressed, using the press connected to a PC. After pressing of 10 samples, the tools changes were measured in exposed place. The measurement was carried out using a MAHR length gauge. The obtained data needed to be corrected (two approach options are presented). Decreases in the surface - wear and tear - arose from the corrected data. The following premise of the wear and tear was adopted based on the intersection of the measured data and the data from the numerical model. As a by-product of the thesis, the temperatures reached during the forming operation were compared and confronted with the numerical model. The temperatures were measured, using a contactless method with a thermal camera. The differences between the numerical models (various versions of the computing software) and the actual processes were explained. In the experiment, the tools were also measured, using the instrument for magnetic field intensity measurement. This, however, is not the actual goal of the thesis. The device, however, is able to detect defects under the surface; thus there is no need for the technologies, such as x-ray or ultrasound, to detect various anomalies. The conditions of the tools can be deduced from the results of this measurement.



Key words:

Wear and tear, durability of forming tools, correction of decrease measurement, numerical model, magnetic field intensity measurement, thermal imaging measurement of temperature, finite element method (FEM)

<b>Obsah disertační práce</b>	<b>strana</b>
Seznam použitého značení a zkratk .....	9
1 Úvod .....	12
2 Přehled současného stavu řešené problematiky .....	14
2.1 Mechanismy opotřebení, problematika nástrojů a principy přístupu k opotřebení .....	14
2.2 Podklady k návrhu nástroje .....	17
2.3 Materiálové vlastnosti nástrojů .....	19
2.4 Provozní zatížení .....	20
2.5 Vliv nesymetrie cyklu zatěžování a jeho součinitel.....	21
2.6 Smyčkové diagramy .....	24
2.7 Tvářecí nástroje namáhané mechanickou únavou.....	30
2.8 Abrasivní opotřebení tvářecích nástrojů .....	32
2.9 Porušení povrchu rotačních tvářecích nástrojů opakovaným tlakem .....	35
3 Cíle disertační práce .....	38
4 Příprava experimentu .....	39
4.1 Zkušební stroj ZD 40 .....	39
4.2 Zkoumané nástroje .....	42
4.3 Materiály nástrojů a polotovarů .....	43
4.4 Zařízení pro termovizní měření teploty .....	50
4.5 Zařízení pro měření intenzit magnetického pole .....	51
4.6 Zařízení pro měření úbytků povrchových vrstev Millimar .....	53
4.7 Korekce měření úbytků povrchových vrstev nástrojů .....	57
4.8 Zařízení pro měření úbytků povrchových vrstev LSCM.....	64
5 Naměřená data .....	67
5.1 Porovnání dosahovaných sil při tváření materiálů S355J2G3 a 16MnCr5 ..	69
5.2 Naměřené úbytky povrchových vrstev při tváření materiálu S355J2G3 .....	75
5.3 Naměřené úbytky povrchových vrstev při tváření materiálu 16MnCr5 .....	84
5.4 Vývoj opotřebení dle naměřených úbytků – shrnutí .....	93
5.5 Snímky povrchu nástroje X210Cr12 ze stereo mikroskopu .....	93
5.6 Snímky povrchu nástroje 60WCrV7 ze stereo mikroskopu .....	95
5.7 Snímky z LSCM mikroskopu .....	97

5.8	Grafy získané z měření LSCM .....	102
5.9	Data získaná z numerického modelu pro tvářený materiál S355J2G3 .....	104
5.10	Data získaná z numerického modelu pro tvářený materiál 16MnCr5 .....	107
5.11	Shrnutí údajů z numerického modelu .....	110
5.12	Porovnání naměřené teploty pomocí termovizní kamery a výsledků výpočtu numerického modelu .....	112
5.13	Naměřené údaje metodou MMM.....	115
6	Závěry .....	121
6.1	Vyhodnocení porovnání dosahovaných sil při tváření materiálů S355J2G3 a 16MnCr5 .....	121
6.2	Vyhodnocení měření úbytků .....	122
6.3	Vyhodnocení dat z LSCM.....	123
6.4	Vyhodnocení snímků nástrojů ze stereo mikroskopu.....	124
6.5	Vyhodnocení údajů z numerického modelu .....	125
6.6	Diference teplot výsledků numerického modelování a procesu .....	125
6.7	Vyhodnocení výsledků MMM.....	126
6.8	Shrnutí.....	127
6.9	Doporučení .....	127
7	Přínos pro vědní obor a praxi .....	129
8	Conclusions.....	130
8.1	The Evaluation of the Comparison of the Reached Forces in Forming of Materials S355J2G3 and 16MnCr5 .....	130
8.2	Evaluation of Decrease Measurement .....	131
8.3	Evaluation of the LSCM Data .....	132
8.4	The Evaluation of the Tool Images from the Stereoscopic Microscope ...	133
8.5	Evaluation of Numerical Model Data .....	134
8.6	The Temperature Difference of the Numeric Modelling Results and Process	135
8.7	Evaluation of the MMM Results .....	135
8.8	Summary.....	136
8.9	Recommendation.....	137
9	Contribution to scientific discipline and practice.....	138
10	Seznam použité literatury .....	139

---

11	Seznam vlastních publikací.....	143
12	Seznam obrázků, grafů a tabulek .....	144
12.1	Seznam obrázků .....	144
12.2	Seznam grafů .....	147
12.3	Seznam tabulek .....	149
13	Přílohy .....	150
13.1	Výkres nástroje z materiálu 60WCrV7 .....	150
13.2	Výkres nástroje z materiálu X210Cr12 .....	151

## Seznam použitého značení a zkratek

Zkratka	Význam
DMM	Dynamický materiálový model
LSCM	Confocal Laser Scanning Microscope – laserový rastrovací konfokální mikroskop
MMM	Metal magnet memory – magnetická paměť materiálu
PVD	Physical vapor deposition - nanášení povlaku jeho odpařením z pevné fáze ve vakuu
SCZ	Stress concentration zones - místa s poruchami

Symbol	Význam	Použité jednotky
$\sigma_m$	Střední napětí	[MPa]
$\sigma_a$	Amplituda napětí	[MPa]
$\sigma_{\min}$	Dolní napětí (též $\sigma_d$ )	[MPa]
$\sigma_{\max}$	Horní napětí (též $\sigma_h$ )	[MPa]
$R$	Součinitel nesymetrie cyklu	[-]
$\sigma_{HC}$	Dvojnásobná mez únavy při míjivém cyklu	[MPa]
$\sigma_C$	Mez únavy	[MPa]
$\sigma_F$	Fiktivní hodnota napětí	[MPa]
$\sigma_N$	Časová mez únavy	[MPa]
$\sigma_u$	Dovolená mez únavy	[MPa]
$N$	Požadovaný počet cyklů	[1]
$N_\infty$	Dimenzovaný počet cyklů (smluvně $10^7$ cyklů)	[1]
$m$	Konstanta	[-]
$\alpha$	Koeficient koncentrace napětí	[-]
$\beta$	Koeficient velikosti součásti	[-]
$\gamma$	Koeficient povrchu	[-]

$k$	Statický koeficient bezpečnosti	[-]
$k_c$	Celkový součinitel bezpečnosti	[-]
$W$	Faktor opotřebení	[-]
$\bar{\sigma}$	Mez kluzu povrchu nástroje	[MPa]
$a$	Empirický koeficient	[-]
$p$	Normálový kontaktní tlak	[MPa]
$\tau$	Smykové napětí deformovaného materiálu v bodě kontaktu	[MPa]
$t$	Doba kontaktu bodu nástroje a def. materiálu	[s]
$v_x$	Relativní tangenciální rychlost v kontaktu s def. mat.	[m/s]
$D_r$	Pěchovací poměr	[1]
$l_0$	Počáteční výška vzorku	[mm]
$l_1$	Konečná výška vzorku	[mm]
$d_0$	Počáteční průměr vzorku	[mm]
$\varepsilon$	Skutečná (logaritmická) deformace	[-]
$e$	Eulerovo číslo	[1]
$l_c$	Celková měřená délka úseku	[mm]
$v_s$	Počáteční naměřená výška	[mm]
$v_f$	Konečná naměřená výška	[mm]
$v_r$	Rozdílná výška od počátku	[mm]
$\alpha$	Úhel sklonu roviny	[°]
$l_i$	Vzdálenost v i-tém bodě měření	[mm]
$ls_i$	Vzdálenost ve sklonu v i-tém bodě měření	[mm]
$v_i$	Změřená výška v i-tém bodě měření	[mm]
$vu_i$	Změřená výška ve sklonu na původní rovinu v i-tém bodě měření	[mm]
$\beta_i$	Úhel sklonu v i-tém bodě	[°]
$\gamma_i$	Úhel sklonu od skloněné roviny v i-tém bodě	[°]
$v_i$	Rozdíl výšky v i-tém bodě měření od počáteční	[mm]

	naměřené výšky	
$vz_i$	Změřená výška v i-tém bodě měření	[mm]
$vu_i$	Přepočtená výška i-tém bodě měření	[mm]
A	Tažnost	[%]
$Kc$	Vrubová houževnatost	[J/m <sup>2</sup> ]
$R_e$	Mez pevnosti v kluzu (mez kluzu)	[MPa]
$R_m$	Mez pevnosti v tahu (mez pevnosti)	[MPa]
Z	Kontrakce	[%]

# 1 Úvod

Snižování nákladů na konečný produkt je v dnešní době jeden z velice sledovaných parametrů všech výrobních procesů. Proto se při volbě optimální technologie výroby stále častěji upřednostňuje technologie tváření.

Velké množství technologií tváření nám umožňuje pokrýt značnou část potřeb. Dochází tak k velkému snížení nákladů na polotovary, neboť velká část tvářecích technologií nám umožňuje tvářet NS (Near Shape), NNS (Near Net Shape), nebo dokonce vyrábět součásti bez dokončovacích prací. Výrobce tak sníží náklady na dokončovací operace o značnou část. S tímto souvisí i další logistické zabezpečení dokončovacích operací a další náklady (kooperace atd.).

Aby výrobce mohl být konkurenceschopný, je nutné minimalizovat všechny náklady. S tím souvisí i náklady na nástroje, které činí poměrně velkou část vstupních nákladů. Proto je sledována tzv. životnost nástrojů. Je tendence konstruovat nástroje na co nejdelší životnost, aby produkovaly co nejdelší dobu bez nutného zásahu (opravy, výměny, renovace).

Objemové tváření za tepla a objemové tváření za studena jsou jedny z velmi silných progresivních technologií, které jsou dostupné pro velkou šíři aplikací ve výrobě. Na trhu existuje velké množství softwarových aplikací, které nám umožní numericky modelovat dané tvářecí nástroje a parametry operací s nimi prováděné, a tak optimalizovat návrh nástroje ještě před započítáním jejich výroby, či nasazením nástroje do samotného výrobního procesu. Tato možnost v sobě skrývá poměrně nákladnou vstupní investici, nejenom na numerické zařízení nutné pro správnou funkčnost použitého softwaru, ale i na kvalifikaci a odbornou znalost obsluhy – konstruktéra, technologa, výpočtáře.



Výroba nástroje by měla být postavena na několika základních postupech:

- Optimalizace návrhu konstrukčního řešení nástroje
- Správná volba materiálu nástroje a jeho tepelné zpracování
- Volba vhodných úprav povrchu nástroje
- Možnosti renovace nástroje

Z výše uvedeného vyplývá, že návrh nástroje není čistě záležitostí konstruktéra/technologa, ale je potřeba do konstrukce nástroje zahrnout i finanční náročnost provozu nástroje.

Při konstrukci je vhodné stanovit určitou finanční mez, kdy je vhodná spotřeba daného nástroje (ideálně výměnné části nástroje) na operaci, přičemž v konečné kalkulaci je výhodnější použití méně ušlechtilých materiálů na nástroj za cenu vyšší spotřeby nástroje (části nástroje). Jak bylo zmíněno v ideálním případě je vhodné nástroj rozdělit na výměnné segmenty, a tyto segmenty nástroje po opotřebení vyměnit. Opotřebení, které zde budu popisovat je bráno jako nežádoucí změna povrchu/rozměrů.

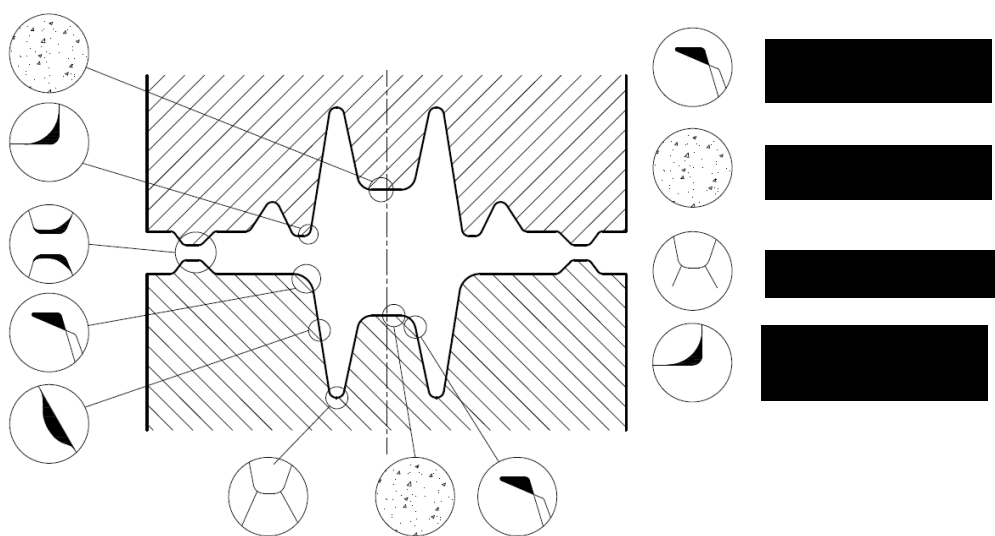
## 2 Přehled současného stavu řešené problematiky

### 2.1 Mechanismy opotřebení, problematika nástrojů a principy přístupu k opotřebení

Opotřebení je, jak již bylo zmíněno, nežádoucí změna povrchu/rozměrů nástroje. Tato změna je většinou nevratná. V historii existovaly i normy, které se zabývaly opotřebením materiálu. Tyto normy jsou již nyní neplatné, např.: ČSN 01 5050 – Opotřebení materiálu – Názvosloví.

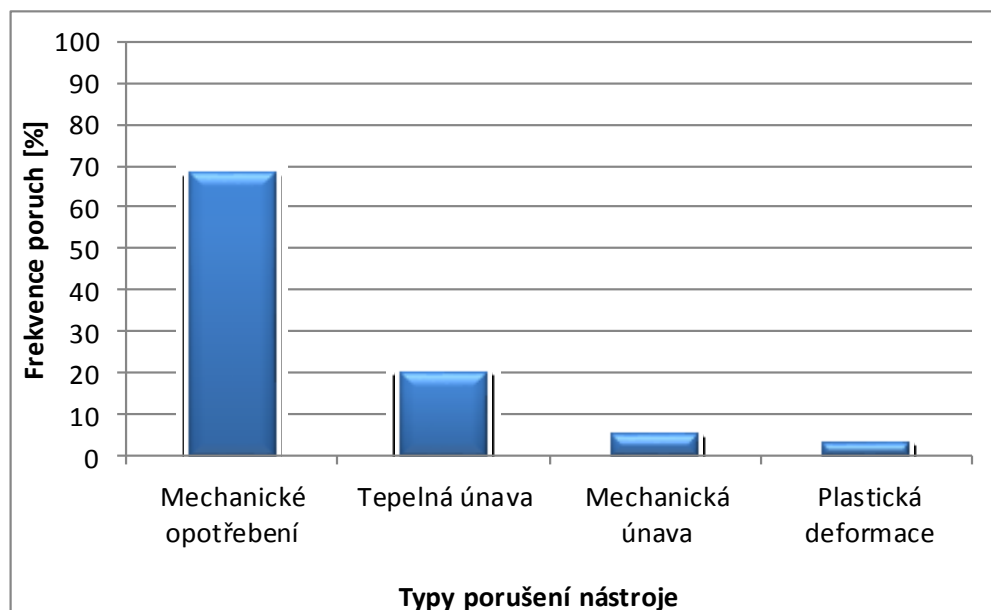
#### 2.1.1 Základní rozdělení mechanismů opotřebení nástrojů a mechanismy snižující životnost

Základní druhy opotřebení působící na nástroj viz obrázek 2.1. Nejčastější typy opotřebení jsou mechanické opotřebení, tepelná a mechanická únava. [1]



Obrázek 2.1: Nejčastější typy opotřebení [2]

Jednotlivé druhy opotřebení je možné minimalizovat vhodnou úpravou tvářecích parametrů. Popřípadě konstrukční, tepelnou či jinou vhodnou úpravou funkčních ploch nástroje. Vhodné je také dostatečné mazání vhodným prostředkem, které nám sníží možnost výskytu abrazivního opotřebení.

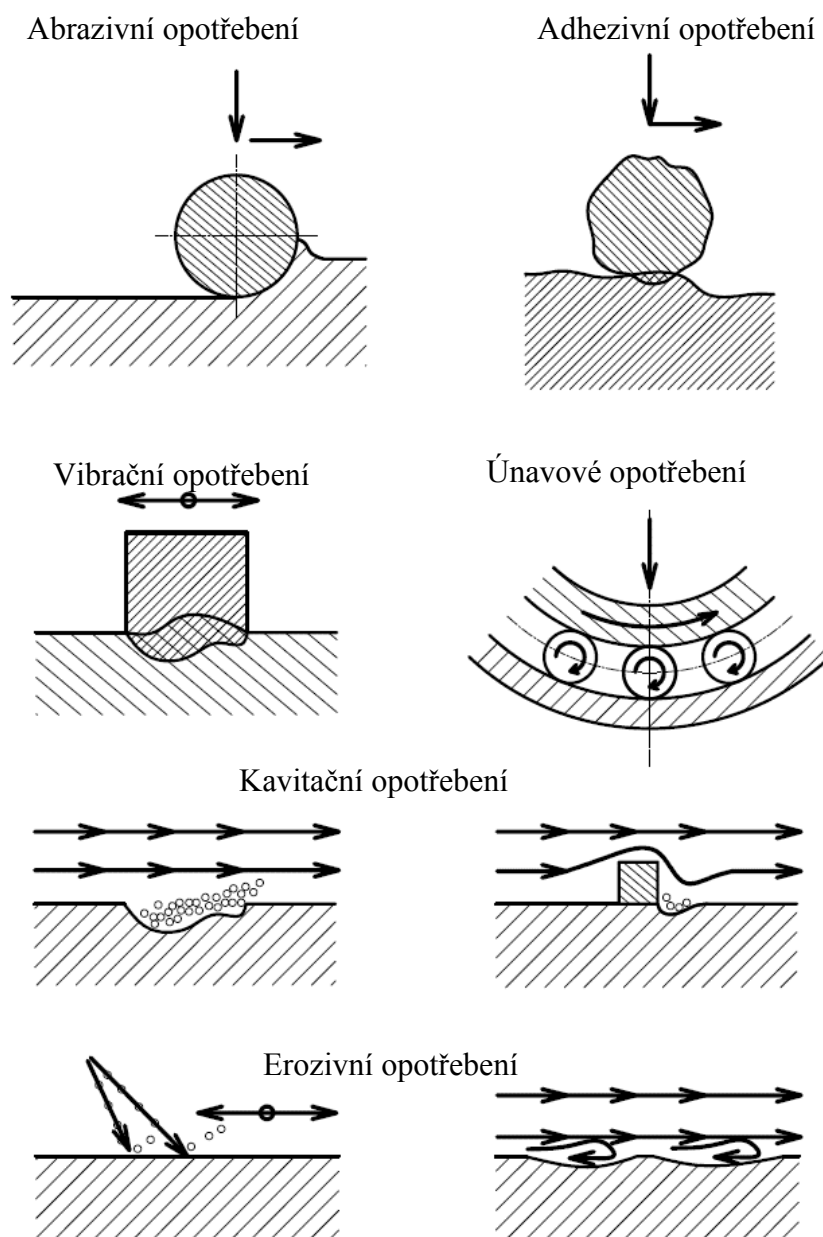


Obrázek 2.2: Procentuální výskyt typických poruch tvářecích nástrojů [2]

Procentuální výskyt poruch na nástrojích demonstruje obrázek 2.2. Z obrázku je zřejmé, že nejčastější výskyt opotřebení nástroje je mechanické opotřebení.

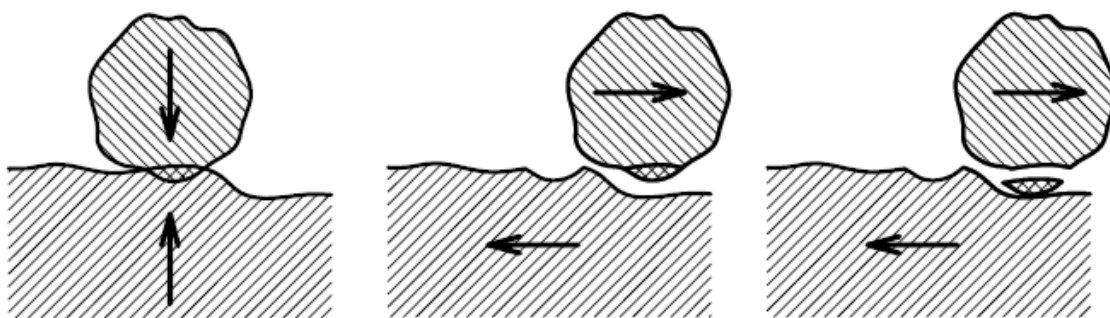
Mezi základní druhy opotřebení patří:

- Mechanické opotřebení
- Tepelná únava
- Mechanická únava
- Konstrukční vruby, lom těles
- Strukturní vruby
- Napětí I. druhu
- Degradace materiálu časem
- Další



Obrázek 2.3: Schématické znázornění druhů opotřebení a jejich tvorba [43]

Mechanismus abrazivního opotřebení se jednoznačně vyskytuje i na nástroji, který budu zkoušet. Obrázek 5.7 ilustruje jasně patrné stopy. Na zmíněném obrázku jsou viditelné stopy po abrazi, které směřují ven z imaginárního středu nástroje. Abrazie se vyskytuje na všech funkčních plochách nástrojů v různé velikosti.



Obrázek 2.4: Detail mechanismu adhezivního opotřebení [43]

Adhezní opotřebení s největší pravděpodobností též ovlivňuje zkoumané nástroje. Velikost opotřebení adhezí je závislá jak na materiálu nástroje, tak na tvářeném materiálu. Na nástrojích můžeme adhezi pozorovat jako ulpívání částecek na stykových plochách. Mechanismus adheze je rozkreslen na obrázku výše (obrázek 2.4). Působením tlaku dojde k ulpění materiálu (mikro-spoji) na jednom z povrchů a při dalším pohybu materiálů dojde k uvolnění ulpěného materiálu. V práci se zmiňuji o tomto materiálu jako o nárůstku, protože jednotlivé kousky materiálu mohou ulpívat na nástroji a tvořit vyvýšené plošky. [43]

## 2.2 Podklady k návrhu nástroje

Mezi základní podklady pro návrh nástroje patří technický výkres daného výrobku, pro který se bude vyrábět nástroj.

Pokud se podobný nástroj již někdy vyskytl, je vhodné konzultovat jeho funkci a případné nedostatky s provozovatelem (ideálně konstruktérem, údržbou, obsluhou) nástroje. Eliminujeme tím možné budoucí potíže a zároveň se můžeme poučit z chyb. Návrh nástroje je často řízen interními dokumenty zadavatele. Takové dokumenty nám často stanovují jaké součásti a materiály je nutné při konstrukci nástroje používat, popřípadě jaké náležitosti by nástroj měl splňovat. Pro konstruktéra nástroje jsou to často velmi omezující dokumenty.

Specifikace výrobku nám umožní vytvořit si bližší představu o velikosti a uspořádání nástroje. Při konstrukci se vychází z těchto specifikací a potřeb zadavatele. Zadavatel by

měl specifikovat pro jaký počet cyklů, by měl být nástroj zkonstruovaný - jaké minimální životnosti by mělo být dosaženo.

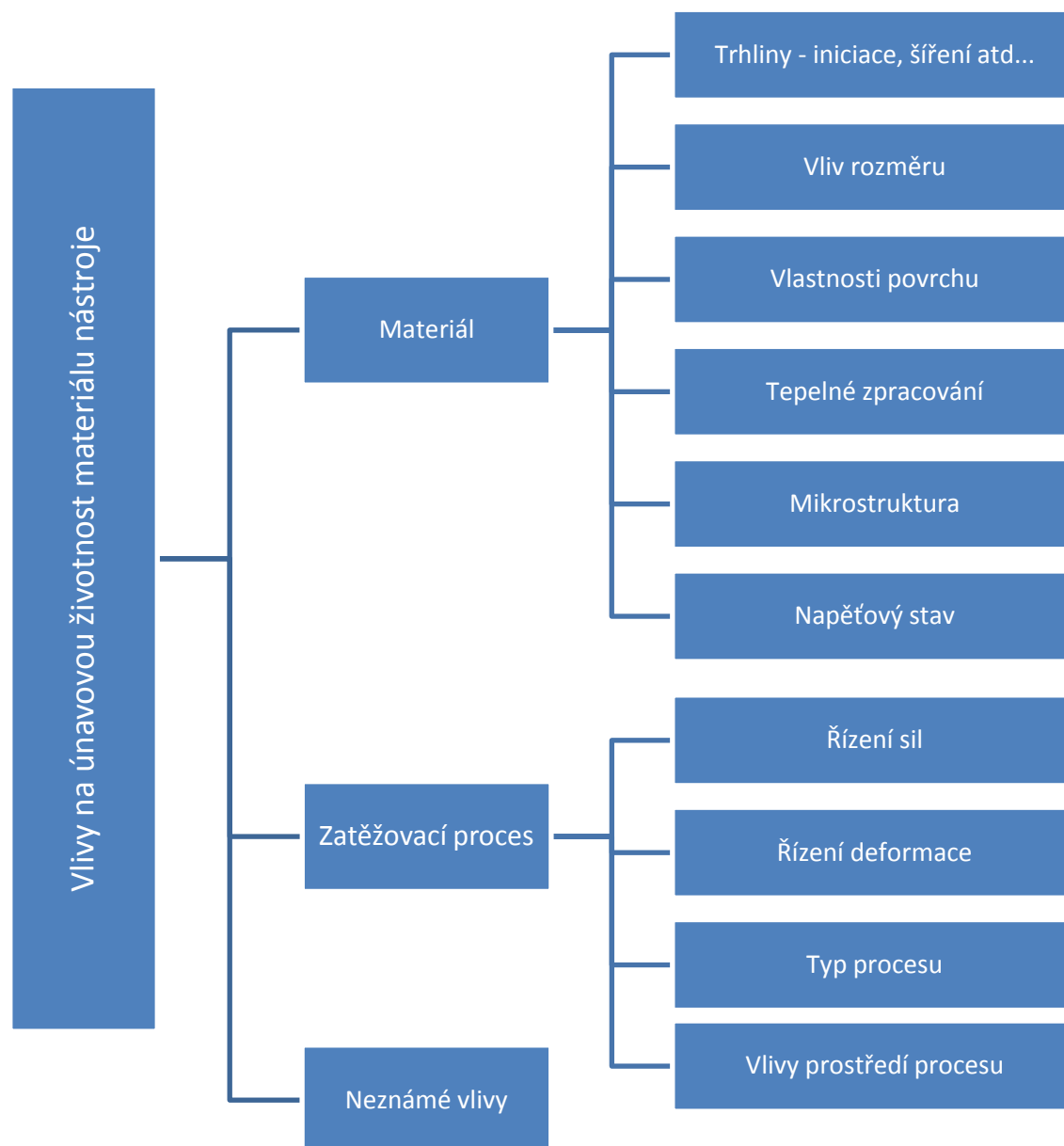
I jednoduché tvářecí nástroje nebývají pouze monolitní. Obvykle se skládá z typizovaných jednotek – normálie a specifických součástí. Normálie jako vodící a vyhazovací kolíky, pouzdra, razníky, střížné vložky atd. jsou součástí většinou snadno vyměnitelné. Hodnota těchto normálií nebývá příliš vysoká - v rámci ceny nástroje.

Podstatně větší cenovou položkou je samotná funkční část nástroje, která je ve styku s polotovarem. Zde je nutné klást velký důraz na vhodný návrh součástí, jako je geometrie, materiál a jeho technologie tepelného zpracování, popřípadě další technologické operace nutné pro správnou funkci nástroje a zajištění požadované životnosti.

Z výše uvedených poznámek je tedy zřejmé, že pro správnou optimalizaci nástroje je vhodné vycházet z napětového stavu funkční části nástroje. Popřípadě z několika návrhů možného uspořádání nástroje. Z těchto návrhů poté vybrat vhodnější variantu návrhu.

Napětový stav nástroje se často zjišťuje jen z funkčních částí nástroje. Volba těchto částí je závislá na konstruktérovi, případně na týmu, který se podílí na návrhu nástroje. V případě predikce napětového stavu kompletního nástroje, by bylo potřeba velmi komplexního softwaru, ale i čas potřebný k analýze by se neúnosně prodloužil. Volíme proto jen funkční část nástroje, u kterého je předpokládán největší namáhání. Tento přístup je vhodný pro zkušené pracovníky.

Vlivy, které mají vliv na životnost nástrojů, jsou přehledně zobrazeny na obrázku níže (obrázek 2.5).



Obrázek 2.5: Schéma vlivů na životnost materiálu nástrojů [7]

## 2.3 Materiálové vlastnosti nástrojů

Nástroje jsou konstruovány z určitého materiálu, v drtivé většině se jedná o několik druhů materiálů. Z obrázku výše plyne, že vliv použitých materiálů na nástroj má významný vliv na únavovou životnost nástroje.

Vlastnosti materiálů musí být dobře popsány, abychom se mohli spolehnout na výsledné predikce numerického modelu nástroje. Materiál je popsán tzv. dynamickým

materiálovým modelem - DMM. Tento DMM obsahuje informace nutné pro výpočet jednotlivých složek napětí, deformací a dalších parametrů.

Správnou volbou materiálů a jejich dalším zpracováním je možné výrazně prodloužit životnost nástroje.

Mezi základní parametry, které se objevují ve výpočtech, jsou jeho mechanické vlastnosti jako  $R_m, R_e, A, Z, Kc$  apod., únavové křivky a mez únavy, cyklicko-plastické vlastnosti, chemické složení materiálu, jeho tepelné zpracování atd.

Materiál nástroje, respektive jeho vlastnosti se pak objevuje ve výpočtech, případně při konstrukci Haighova diagramu apod. [21][22]

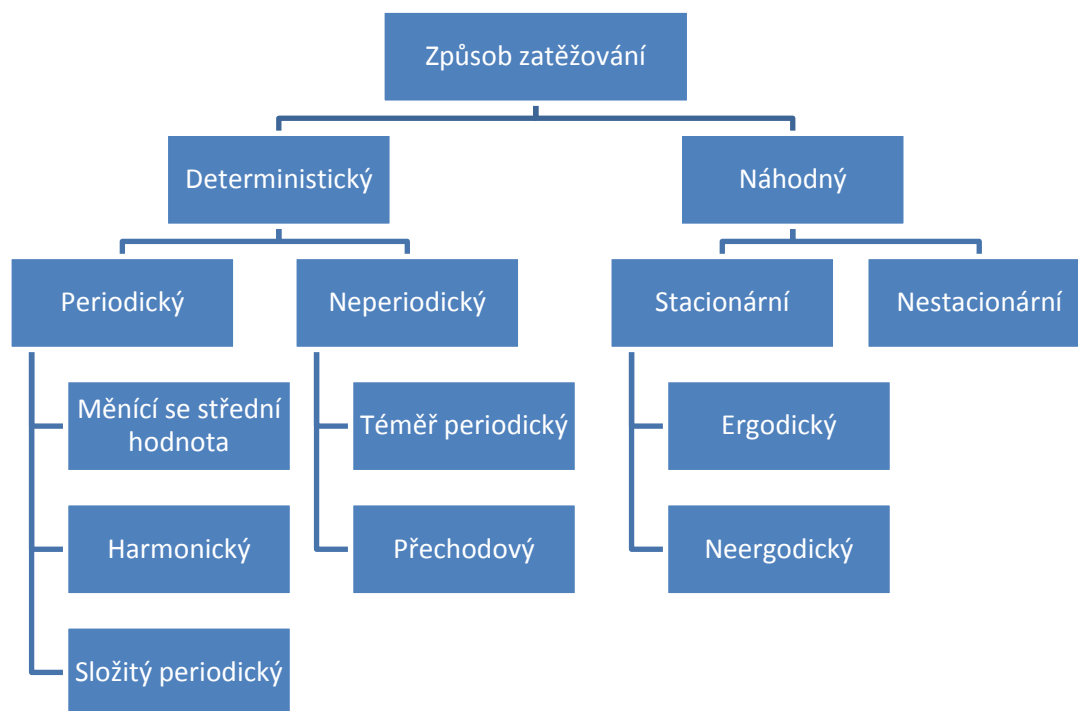
## 2.4 Provozní zatížení

Mechanismus zatěžování nástroje je velmi důležitým prvkem, který musíme zohlednit při návrhu nástroje.

Skutečné zatěžování můžeme rozdělit do dvou kategorií (viz obrázek 2.6), na náhodné a deterministické. Při návrhu konstrukcí je ze 4/5 součástí zatěžováno náhodně. Při návrhu nástroje pro tvářecí operace, jako je protlačování za studena nebo za tepla, je nástroj zatěžován spíše deterministicky. Pokud by se jednalo o nástroj pro tváření za tepla, jako je např. zápustka, je zřejmé, že by model zatěžování byl náhodný.

Podle úrovně automatizace se pak jedná o zatěžování periodické, nejčastěji periodické složité zatěžování (plně automatizované výrobní linky). Nebo náhodné zatěžování u manuálně obsluhovaného zařízení. [12][12]





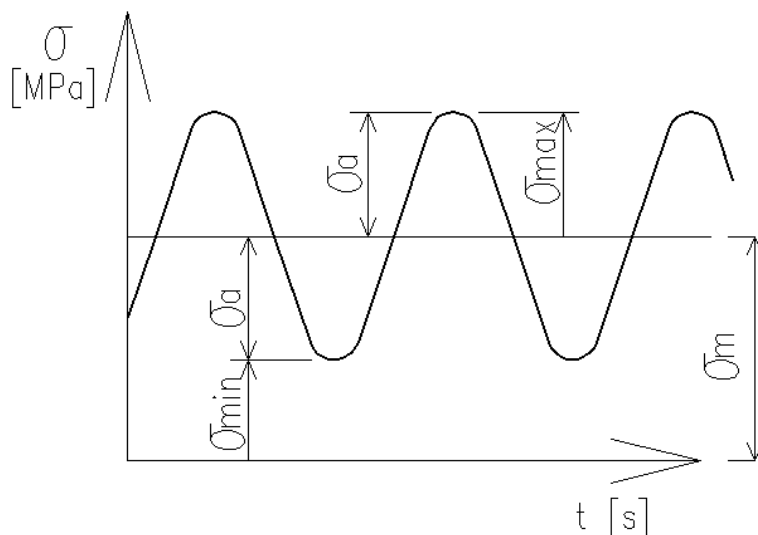
Obrázek 2.6: Druhy zatěžování nástroje [12]

Všechny níže popsané typy zatížení se dají rozložit na neustále se opakující kmity napětí (síly). Označení jednotlivých veličin napětí v jednom kmitu lze nalézt v normě ČSN 42 0362.

## 2.5 Vliv nesymetrie cyklu zatěžování a jeho součinitel

Zatěžování strojních součástí je nejčastěji nesymetrické se statickou složkou napětí (předpětí). Je prokázáno, že zvětšíme-li statickou složku napětí cyklu, musíme zmenšit amplitudy napětí, aby životnost součástí zůstala konstantní. Pouze výjimečně se životnost nemění.

Vliv nesymetrie cyklu bývá zaznačena v tzv. smyčkových diagramech, používají se Haighova, Smithova nebo Gerber-Weyrauchova diagramu. [12]



Obrázek 2.7: Popis kmitu cyklu [7]

Legenda k popisu kmitu cyklu (obrázek 2.7):

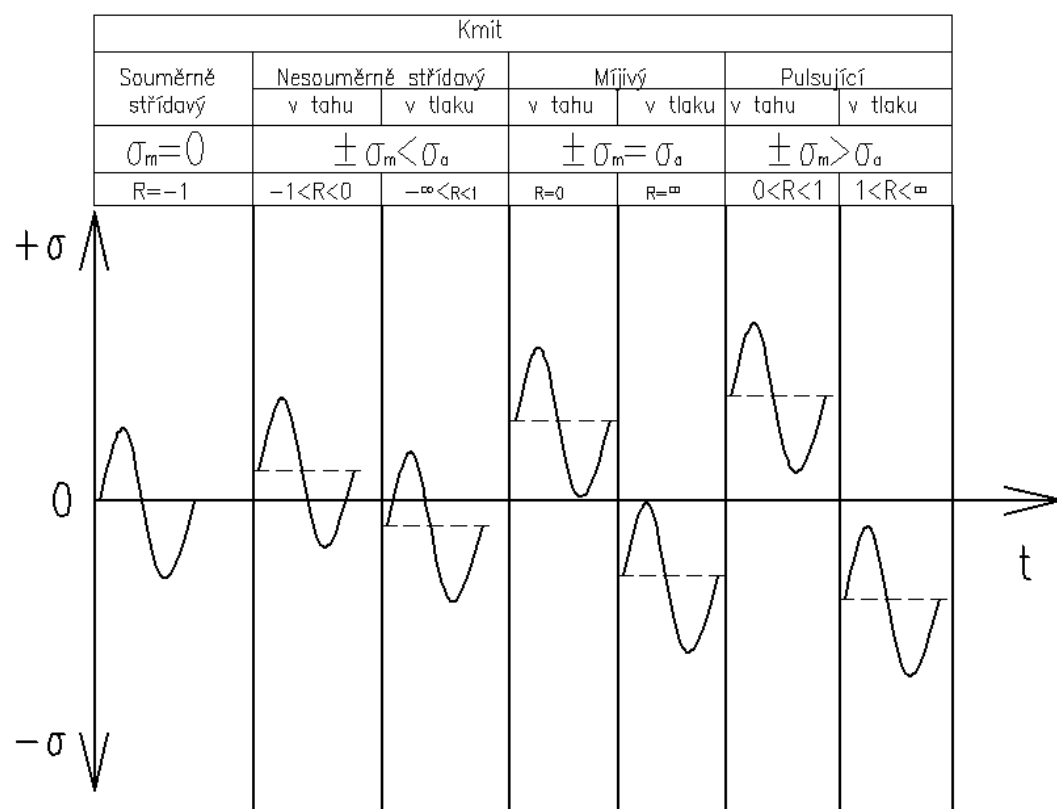
- $\sigma_m$  Střední napětí (statická složka cyklu) [MPa]
- $\sigma_a$  Amplituda napětí (dynamická složka cyklu) [MPa]
- $\sigma_{min}$  Dolní napětí (bývá značeno  $\sigma_d$ ) [MPa]
- $\sigma_{max}$  Horní napětí (bývá značeno  $\sigma_h$ ) [MPa]

Součinitel velikosti nesymetrie cyklu lze početně vyjádřit jako v rovnici (1).

$$R = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a} = \frac{\sigma_d}{\sigma_h} \quad (1)$$

Veličiny jako  $\sigma_m$ ,  $\sigma_a$  a jejich vzájemný vztah je patrný z popisu kmitu (obrázek 2.7).

Pro  $R < -1$ ,  $-1 < R < 0$  označujeme cyklus jako nesymetrický střídavý.  $R = -1$  je cyklus symetricky střídavý,  $R = 0$  je označován jako míjivý cyklus a  $R > 0$  jako cyklus pulsující. Pro lepší přehled viz obrázek 2.8. [12]

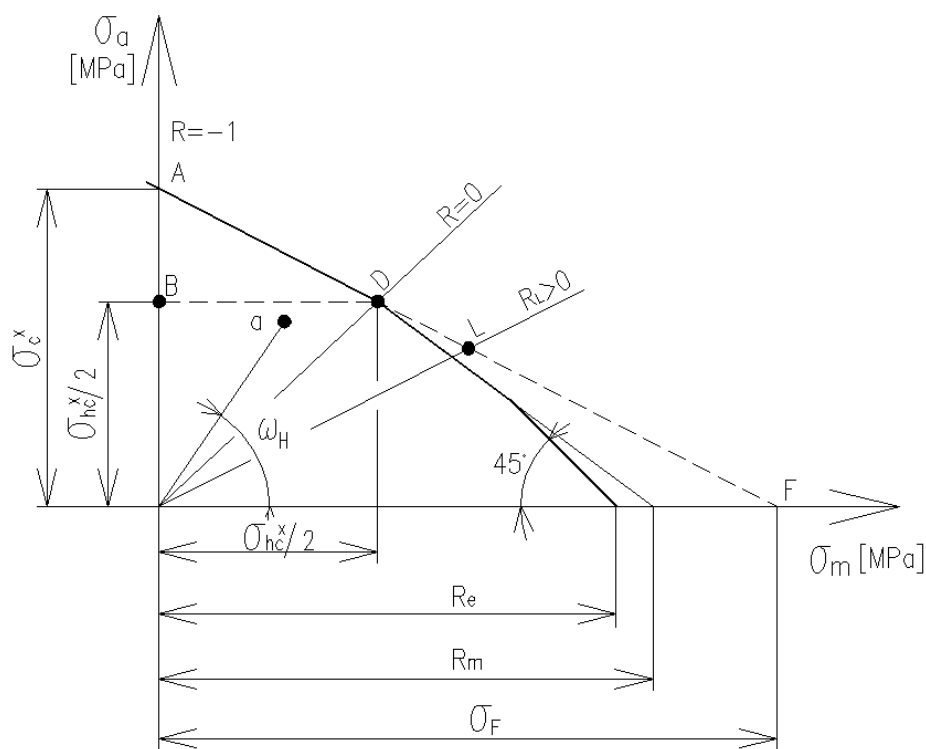


Obrázek 2.8: Rozlišení nesymetrie cyklu [7][12]

## 2.6 Smyčkové diagramy

### 2.6.1 Haighův smyčkový diagram

Mezní křivka je v Haighově diagramu [7][12] (obrázek 2.9) kreslena silnou plnou čarou, která protíná osu v bodě, který je dán mezi únavy symetrického střídavého cyklu skutečné hladké součásti v tahu-tlaku nebo ohybu.



Obrázek 2.9: Haighův diagram [7][12]

Legenda k Haighově diagramu (obrázek 2.9):

- $\sigma_{HC}$  Dvojnásobná mez únavy při mĭjivém cyklu [MPa]
- $\sigma_C$  Dovolená mez únavy [MPa]
- $R_e$  Mez kluzu [MPa]
- $R_m$  Mez pevnosti [MPa]
- $\sigma_F$  Fiktivní hodnota napětí [MPa]

V digramu se vyskytuje hodnota  $\sigma_F$ , tato hodnota bývá označována jako fiktivní hodnota napětí. Tato hodnota se mění v závislosti na namáhání na pevnosti materiálu (osové zatížení viz rovnice (2), ohybové zatížení viz rovnice (3), krutové zatížení viz rovnice (4)).

$$\sigma_F = R_m \quad (2)$$

$$\sigma_F = (1,5 \div 1,7) R_m \quad (3)$$

$$\sigma_F = (0,7 \div 0,8) R_m \quad (4)$$

## 2.6.2 Zjednodušený Haighův diagram

Haighův zjednodušený diagram [7][12][15] viz obrázek 2.12.

Spojnice mezi body  $\sigma_p, \sigma_c$  je označována jako limitní hodnota životnosti. V praxi rozeznáváme dvě hodnoty životnosti, a to mez nízko-cyklové životnosti, která má hodnotu  $N = 10^3$ , a mez vysoko-cyklové životnosti  $N = 10^7$ .

Časová mez únavy je označována  $\sigma_N$ . Časová mez únavy se pak spočítá dle rovnice (5) [42].

$$\sigma_N = \sigma_C = \sigma_u \cdot \sqrt[m]{\frac{N_\infty}{N}} \quad (5)$$

Legenda k rovnici (5):

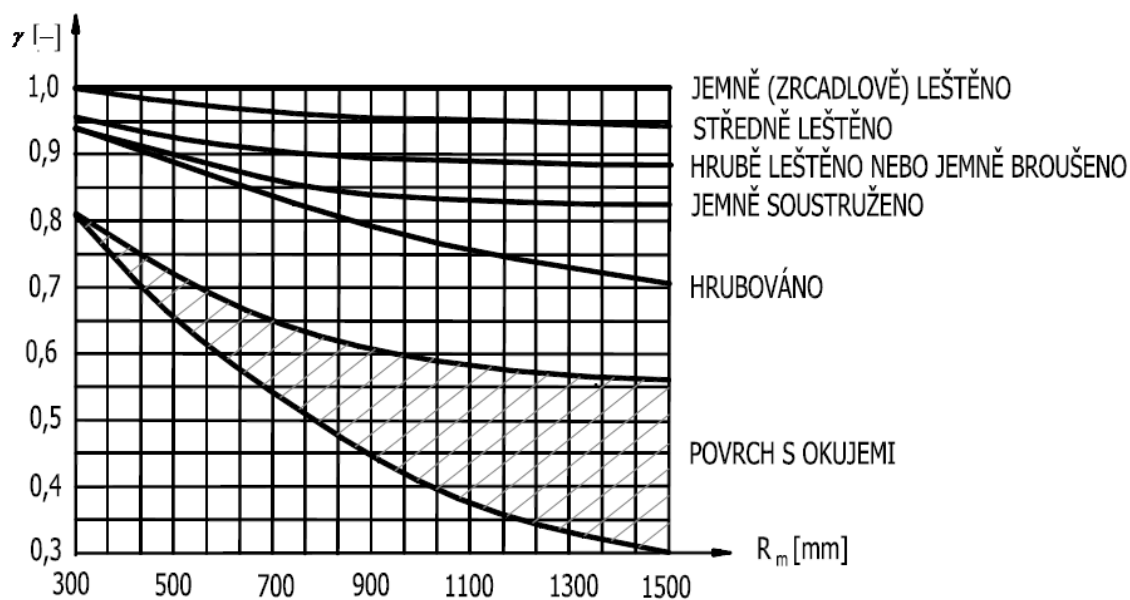
- $\sigma_N$  Mez únavy [MPa]
- $\sigma_u$  Dovolená mez únavy [MPa]
- $N_\infty$  Počet cyklů, na který je dimenzován výpočet [1]
- $N$  Požadovaný počet cyklů [1]
- $m$  Konstanta  $6 \div 10$ , odhadována na základě provozní životnosti

Dovolená mez únavy se vypočítá jako podíl meze únavy a součinitele bezpečnosti. Popřípadě, lze dovolenou mez únavy vypočítat dle rovnice (6) [42].

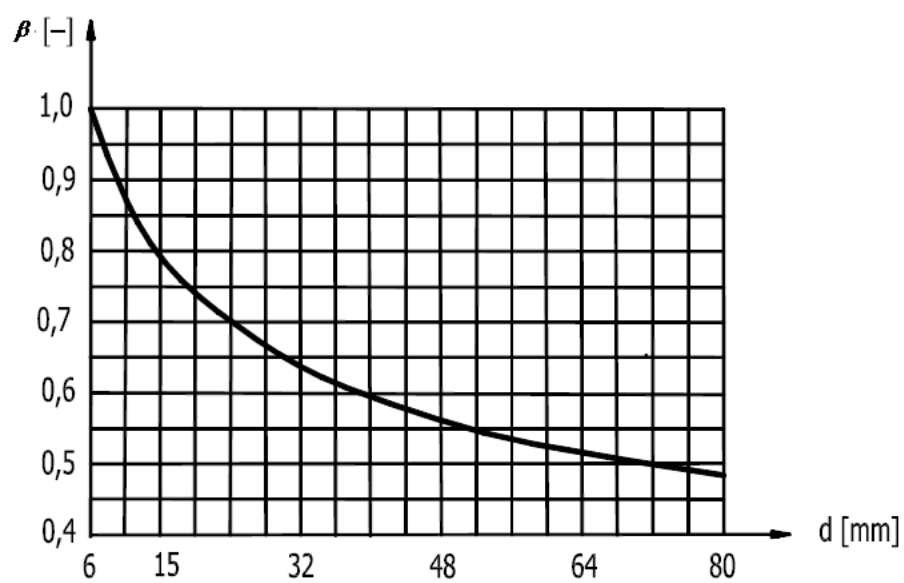
$$\sigma_u = \frac{\sigma_c}{k \cdot \alpha \cdot \beta} \cdot \gamma = \frac{\sigma_c}{k_c} \quad (6)$$

Legenda k rovnici (6):

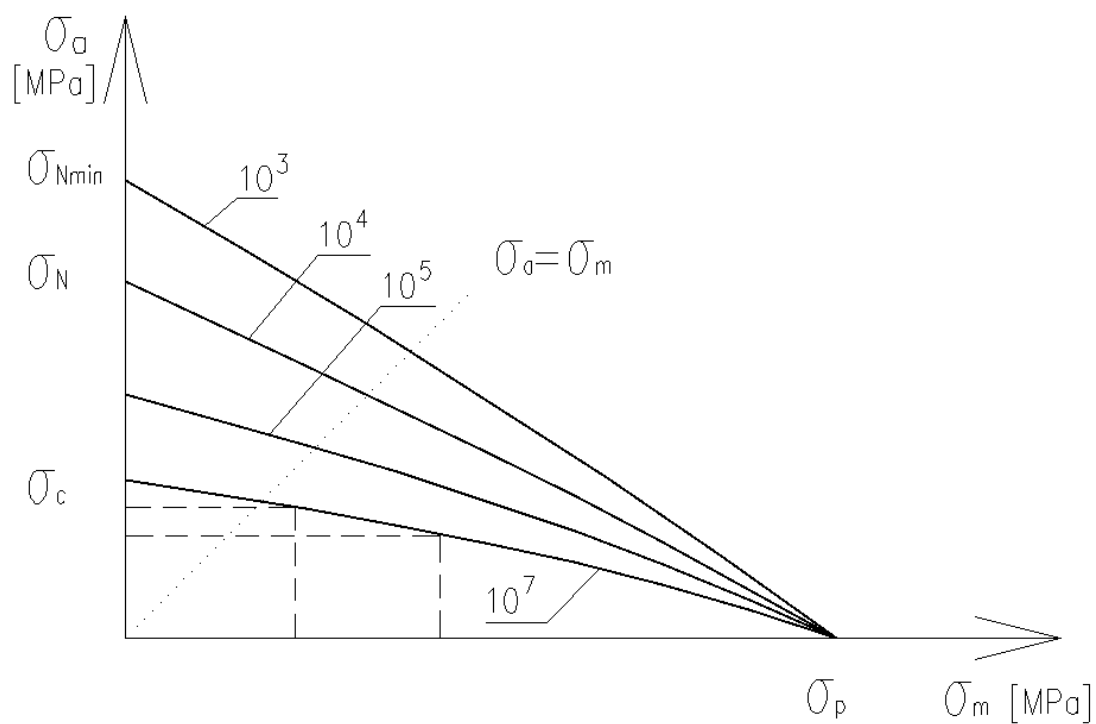
- $\alpha$  Koeficient koncentrace napětí [-]
- $\beta$  Koeficient velikosti součásti (obrázek 2.11) [-]
- $\gamma$  Koeficient povrchu (obrázek 2.10) [-]
- $k$  Statický koeficient bezpečnosti
- $k_c$  Celkový součinitel bezpečnosti



Obrázek 2.10: Diagram pro určení koeficientu povrchu [15]



Obrázek 2.11: Diagram pro určení koeficientu velikosti součásti [15]



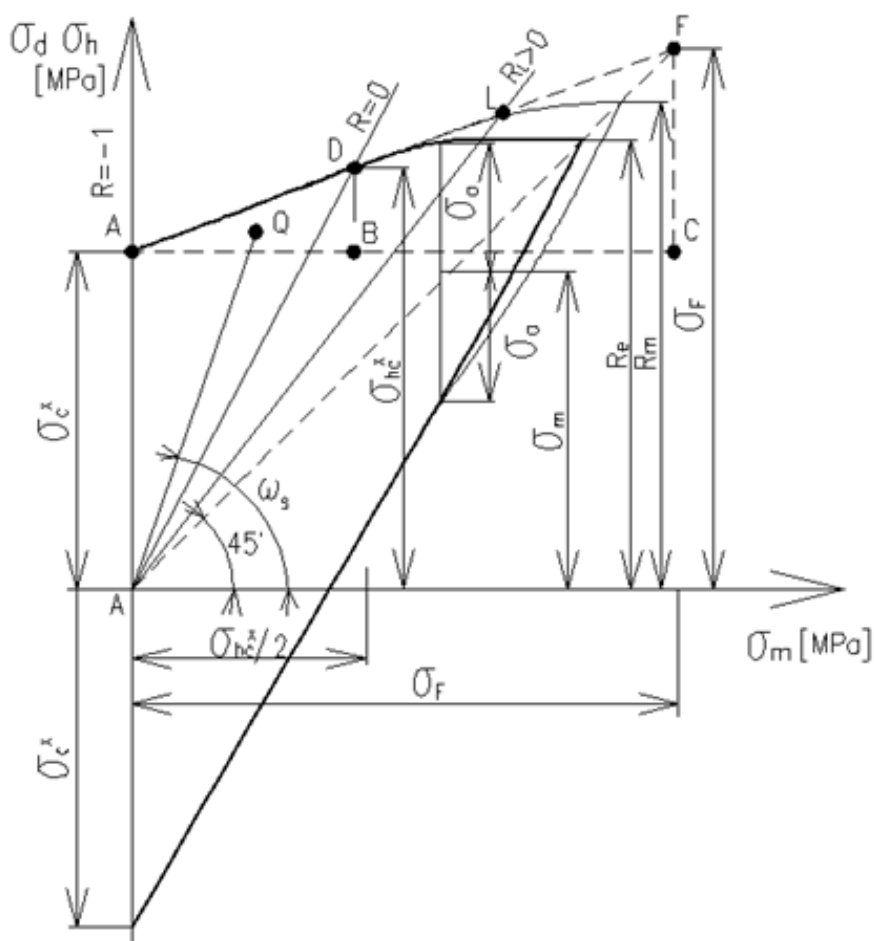
Obrázek 2.12: Zjednodušený Haighův diagram [7]

### 2.6.3 Smithův smyčkový diagram

Smithův diagram [7][12] (obrázek 2.13) se konstruuje obdobně jako Haighův diagram (obrázek 2.9). Jde vlastně o Haighův diagram, jehož vodorovná osa je pootočená o  $45^\circ$  proti směru hodinových ručiček. Na osu X vyneseme střední napětí  $\sigma_m$ , na osu Y vyneseme horní napětí  $\sigma_h$  ( $\sigma_d = \sigma_m + \sigma_a$ ), dolní napětí  $\sigma_d$  ( $\sigma_d = \sigma_m - \sigma_a$ ). Mezní křivky jsou dvě, označují dolní a horní napětí cyklu. Horní napětí je obdobně omezeno mezi kluzu  $R_e$ .

Úhel  $w_s$  lze spočítat pomocí rovnice (7).

$$w_s = \arctg\left(\frac{2}{1+R}\right) \quad (7)$$



Obrázek 2.13: Smithův smyčkový diagram [7]



## 2.6.4 Popis mezních křivek

Na tuto kapitolu jsem čerpal z literatury [2][7][12].

Pro popis mezních křivek (srovnání křivek na obrázek 2.14), je navrženo několik rovnic. Pomocí těchto rovnic můžeme stanovit vztah mezi  $\sigma_m$ ,  $\sigma_a$  a mezi materiálovými vlastnostmi jako jsou mez kluzu  $\sigma_k$ , mez pevnosti  $\sigma_p$ , nebo mez únavy  $\sigma_c$ .

K popisu mezní křivky můžeme použít Goodmanovu modifikovanou přímku – rovnice (8).

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_c^x} = 1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \quad (8)$$

Popřípadě Goodmanovu mezní přímku. Tato přímka se liší od Goodmanovy mezní modifikované přímky tím, že není tak přísná pro posuzování odhadu životnosti. Ta se liší podle počtu cyklů pro  $N_\infty$  cyklů platí rovnice (9), pro  $N$  cyklů platí rovnice (10).

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_u} = 1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \quad (9)$$

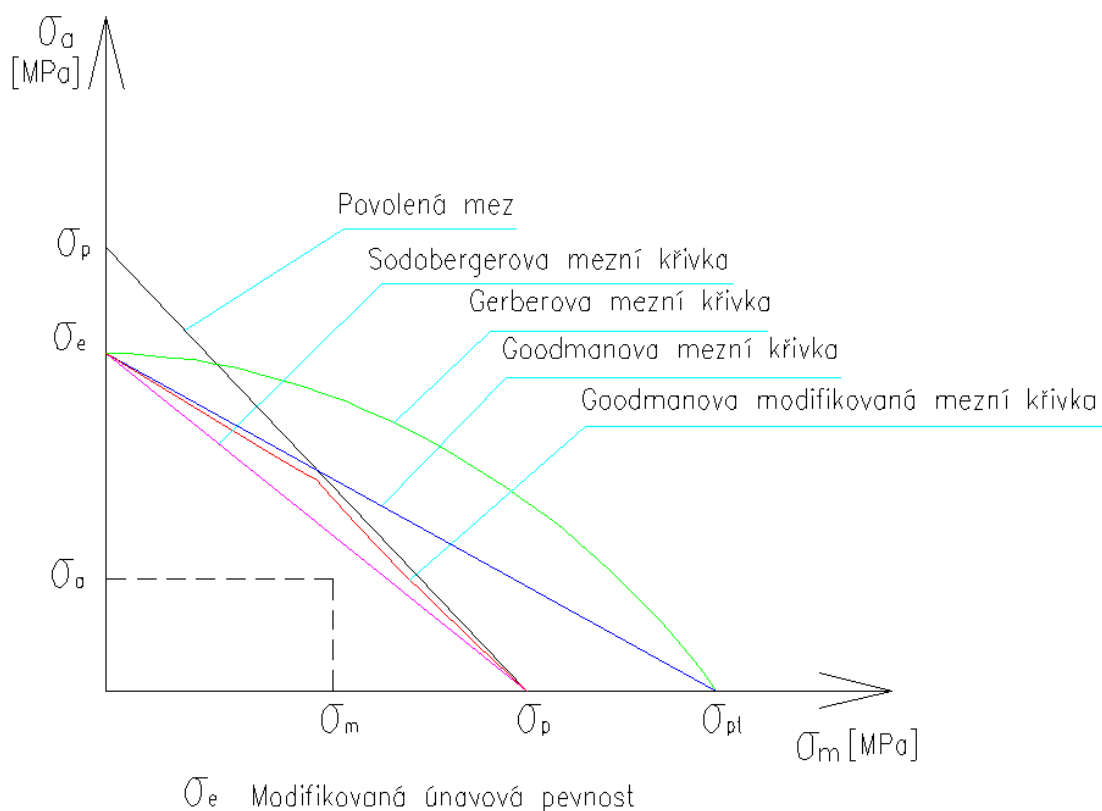
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_N} = 1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \quad (10)$$

V případě, že poškození by mělo katastrofální následky, bývá nahrazována přímkou Sodebergovou – rovnice (11).

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_c^x} = 1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \quad (11)$$

Často se používá i mezní křivky navržené Gerberem, spočitatelná dle rovnice (12).

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_c^x} = 1 - \left( \frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2 \quad (12)$$

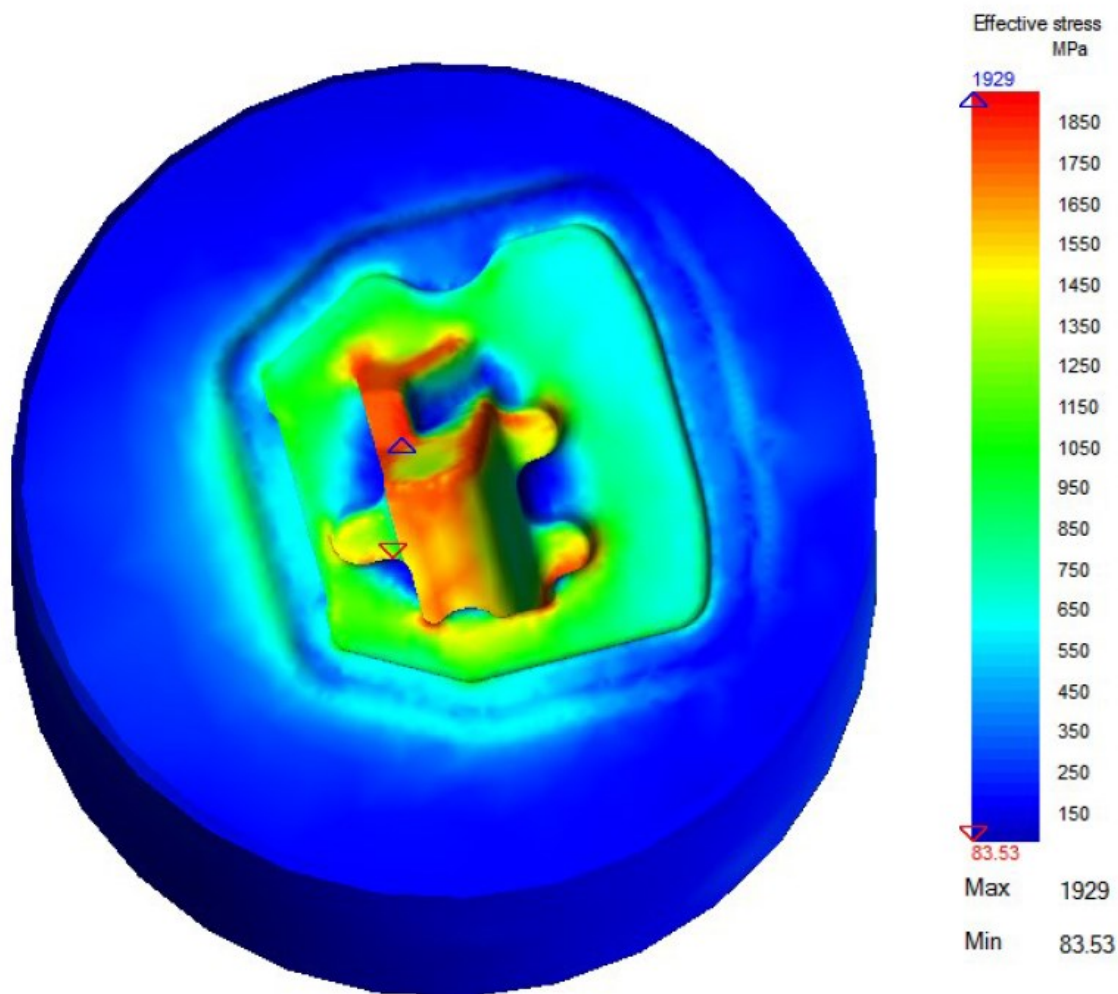


Obrázek 2.14: Porovnání mezních křivek dle různých autorů [2][7][12]

Dále má vliv na tvar mezních křivek množství, tvar a počet vrubů, teplota, agresivita prostředí atd.

## 2.7 Tvářecí nástroje namáhané mechanickou únavou

Cyklické namáhání je charakterizováno amplitudou napětí a středním napětím, jak bylo popsáno výše. Vztah mezi amplitudou, středním napětím a materiálovými vlastnostmi jako mez únavy, mez kluzu nebo mez pevnosti lze vyjádřit několika vztahy, graficky vyjádřenými tzv. Smithovými nebo Haighovými diagramy (obrázek 2.12 a obrázek 2.13).



Obrázek 2.15: Pole efektivního napětí kovací zápustky  
v okamžiku maxima zatížení [44]

Východiskem je dle Woehlerova přiblížení Goodmanova linie k sestrojení zjednodušeného Haighova diagramu [30][34][35] (obrázek 2.19), kde je obecně křivka, spojující mez pevnosti na vodorovné ose s mezí únavy na svislé ose, považována za limitní s neomezenou životností. Přímka pro daný způsob zatěžování na svislé ose vyznačuje časovou mez únavy a vyjadřuje tak empirickou závislost logaritmu poměrné životnosti, vyjádřené počtem výrobních cyklů, na poměrném napětí v relaci k dovolené mezi únavy:

$$N = N_{\infty} \left( \frac{\sigma_c}{k\sigma_N} \right)^m \quad (13)$$

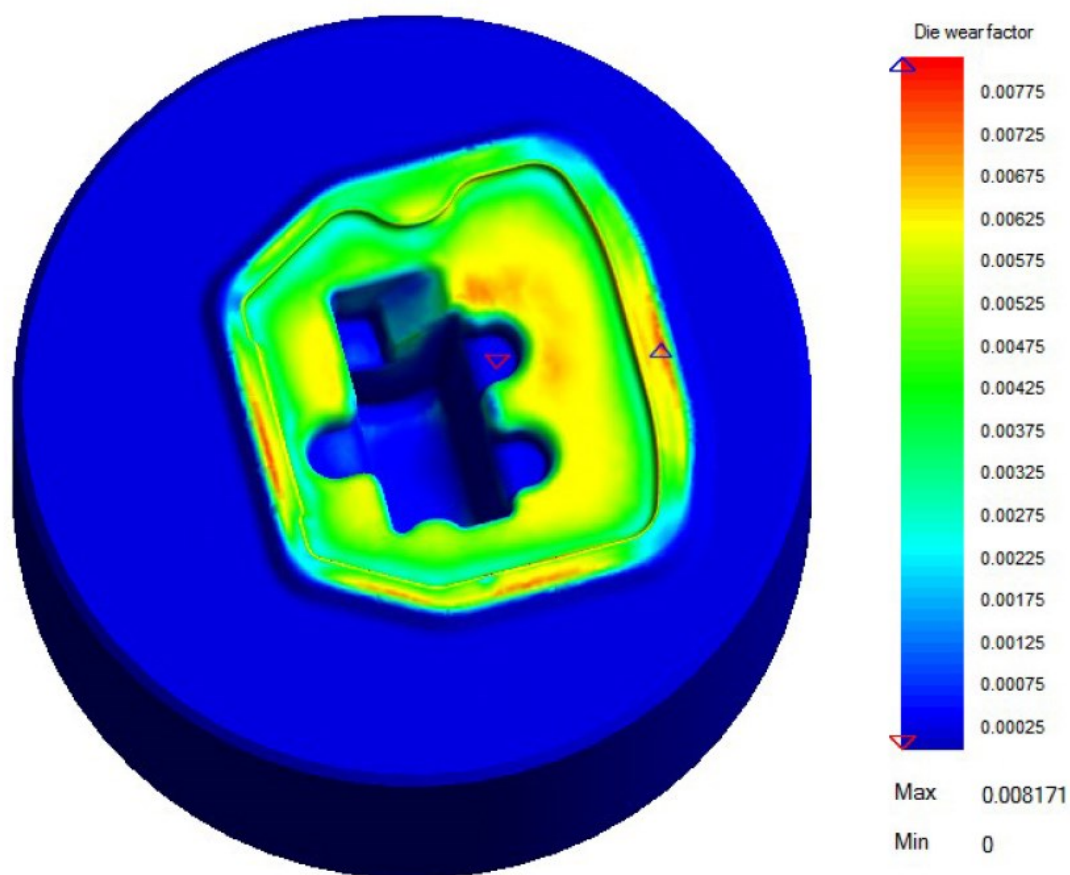
Legenda k rovnici (20):

- $\sigma_N$  Časová mez únavy z FEM analýzy [MPa]
- $\sigma_C$  Mez únavy [MPa]
- $N_\infty$   $10^7$  cyklů – smluvní koeficient [1]
- $N$  Počet cyklů do poruchy [1]
- $k$  Bezpečnostní koeficient [-]
- $m$  Empirický exponent [-]

Příklad analýzy byl realizován pro technologii tváření polotovaru vratového závěsu v celistvé armované záпустce z houževnaté nástrojové oceli CPM 1V, vyrobené práškovou metalurgií, jejíž funkční plochy jsou opatřeny PVD povlakem (obrázek 2.15). Rozložení, gradient a poloha extrémů efektivního napětí v jednotlivých funkčních částech nástroje umožňuje analyzovat namáhání kovacího nástroje a predikovat možné změny konstrukce k ovlivnění jeho životnosti.

## 2.8 Abrazivní opotřebení tvářecích nástrojů

Mechanismus adhezivního opotřebení nástroje během deformace zahrnuje výskyt adhezních kovových vazeb, které vytvoří chemickou sloučeninu mezi kovem a kyslíkem, který následně plasticky deformuje kovovou vazbu. Jako výsledný produkt je destrukce nástroje a materiálu v kontaktní zóně [31][32][39]. Mechanismus poškození adhezni hranice během plastické deformace je dislokace a probíhá plynule v rámci jednotlivých cyklů zatěžování.



Obrázek 2.16: Expozice faktoru opotřebení kovací zápustky ve finální poloze [44]

Pro výpočet hodnot abrazivního opotřebení nástroje jsou zpravidla uvažovány následující předpoklady: výkon třecí síly během plastické deformace na polotovar je roven výkonu plastické deformace v místě kontaktu, který je opotřebováván. Hloubku opotřebení nástroje v jakémkoliv bodě povrchu během kontaktní doby lze teoreticky stanovit dle vztahů (21) pro tlakově (rovnice (14)) nebo trakčně (rovnice (15)) závislý model [33][38]:

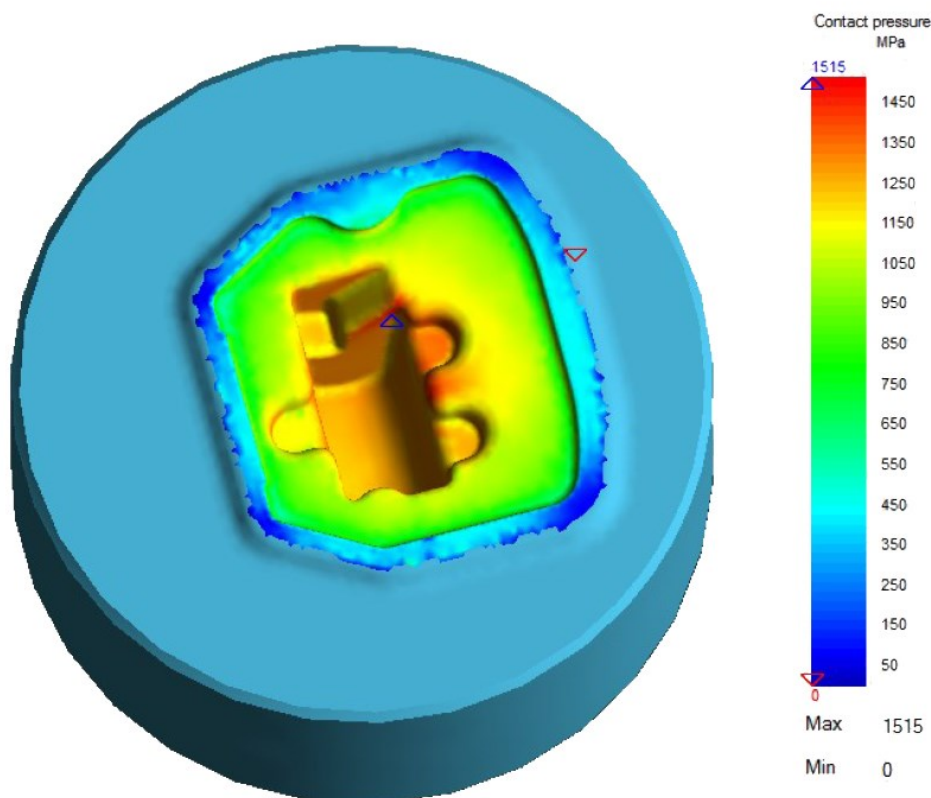
$$W = \int_0^t \frac{a \cdot p \cdot v_x}{\sigma} dt \quad (14)$$

$$W = \int_0^t \frac{a \cdot \tau \cdot v_x}{\sigma} dt \quad (15)$$

Legenda k rovnici (14) a (15):

- $W$  Faktor opotřebení [m]
- $\bar{\sigma}$  Mez kluzu povrchu nástroje [MPa]
- $a$  Empirický koeficient [-]
- $p$  Normálový kontaktní tlak [MPa]
- $\tau$  Smykové napětí deformovaného materiálu v bodě kontaktu [MPa]
- $t$  Doba kontaktu bodu nástroje a def. materiálu [s]
- $v_x$  Relativní tangenciální rychlost v kontaktu s def. mat. [m/s]

Rozložení faktoru opotřebení, zejména lokalizace maxima pro trakční model (obrázek 2.16), umožní z analýzy metodou konečných prvků predikovat abrazivní opotřebení v prvním přiblížení jen jako kvalitativní odhad. Pro možné srovnání technologických a konstrukčních variant provedení tvářecího nástroje to lze přijmout jako postačující. Kvantitativní predikci hloubky opotřebení lze provést při realizaci experimentálních měření pro konkrétní kombinaci tvářecího nástroje a deformovaného materiálu [33][36][37].

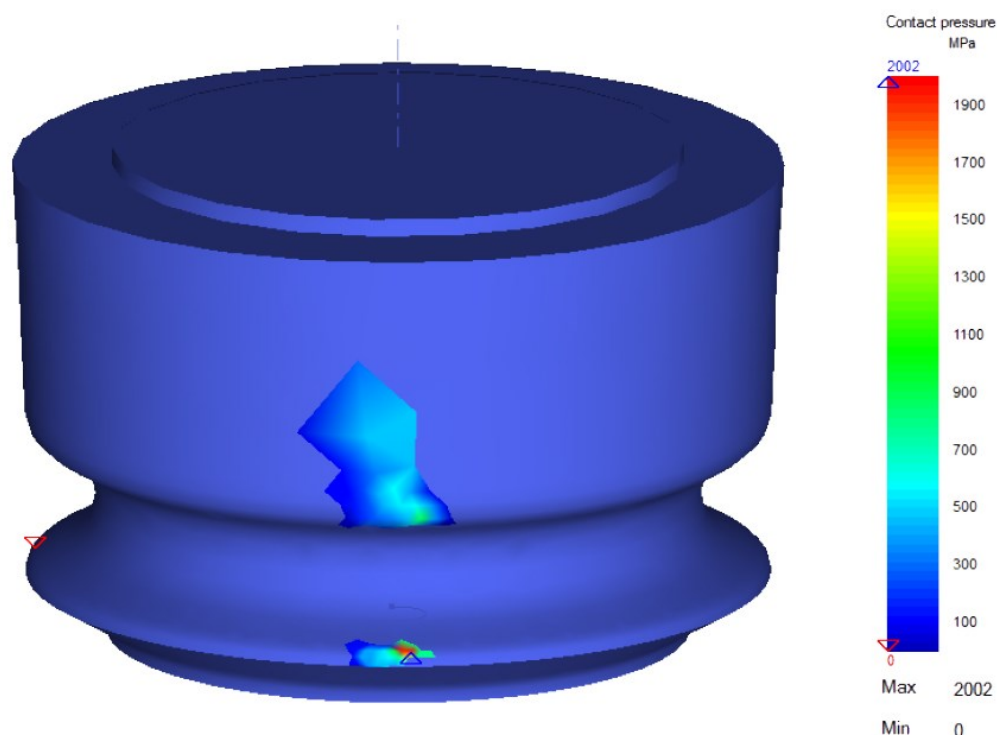


Obrázek 2.17: Rozložení kontaktního tlaku v dutině kovací zápustky při maximu zatížení [44]

Porušení povrchu cyklickým tlakem lze indikovat na základě tlakově závislého modelu z analýzy pole kontaktního tlaku na funkčních plochách dutiny nástroje (obrázek 2.17). Z porovnání obrázků (obrázek 2.15 až obrázek 2.17) je patrný rozdíl v lokalizaci účinků cyklického namáhání v daném komplexu vlivů.

## 2.9 Porušení povrchu rotačních tvářecích nástrojů opakovaným tlakem

Rotující tvářecí nástroje používané nejčastěji v technologiích válcování jsou zpravidla kompaktní a k porušení zpravidla nedochází lomem. Jako dominantní zde vystupuje narušení povrchu opakovaným tlakem, který vede ke kavitační erozi, a abrazí danou při odvalování rozdílnou rychlostí v kontaktu nástroje a deformovaného materiálu [40].

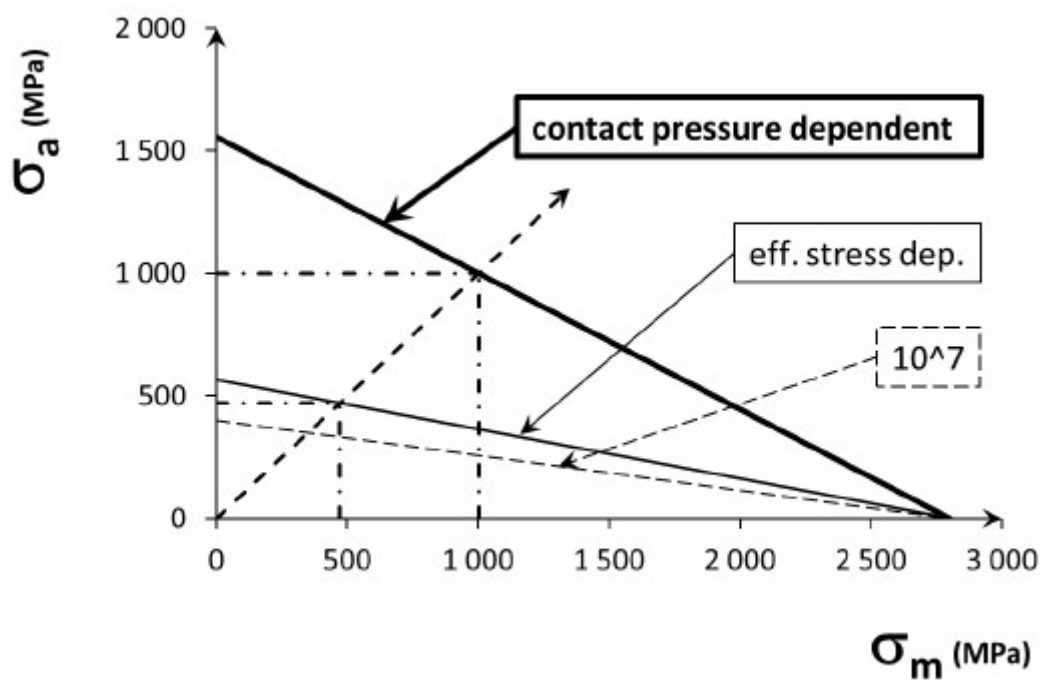


Obrázek 2.18: Rozložení tlaku na kontaktní ploše pracovního válce [44]

Lokalizace maxima efektivního napětí a kontaktního tlaku je prakticky shodná. Kontaktní tlak u válcovacích nástrojů technologie orbitálního tvarování obručí železničních kol ale zpravidla značně převyšuje hladinu hodnot efektivního napětí (obrázek 2.18). Rozložení, gradient a maximum kontaktního tlaku ve spojitosti s výslednou integritou povrchu, bude pro predikci opotřebení tvářecích válců klíčovým parametrem na rozdíl od ostatních analyzovaných účinků [41].

Vyhodnocení životnosti pro nejvíce exponovaný pracovní válec, dokládá dominantní závislost životnosti na míjivém tlaku podél linie kontaktu s deformovaným polotovarem (obrázek 2.19). Porušení lomem v daném případě dojde jen zcela výjimečně. Na základě expozice tlaku, který v čase kontaktu narůstá od nuly do maxima, dojde k vylamování povrchu s pravděpodobností o tři řády vyšší. K popsánímu jevu dochází po celém obvodu v šíři odpovídající intenzitě dynamicky proměnného toku materiálu během požadované deformace zúčastněného objemu polotovaru.





Obrázek 2.19: Varianty Goodmannovy linie pracovního válce dle cyklického zatěžování [44]

### 3 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je výzkum metod predikce životnosti v konstrukci tvářecích nástrojů. Zaměřuje se na základní způsob tváření. Základním cílem je návrh experimentu, který bude snadno realizovatelný v daných podmínkách. Navržený experiment by měl dovolit jeho reprodukovatelnost na jiných zařízeních tak, aby bylo možné výsledky ověřit. Ověření experimentu na jiném zařízení ale není součástí této práce. V disertační práci by také měly být navrženy způsoby vyhodnocení experimentů a pomocí těchto návrhů by mělo být dosaženo závěru. Kromě hlavního experimentu, budou provedeny měření teploty a jejich porovnání s numerickým modelem. Případné rozdíly teplot by měly být objasněny. Jako možným vypovídacím nástrojem o životnosti nástrojů by se jevilo i měření metodou MMM (Metal magnet memory). Nástroje budou změřeny pomocí této metody a bude přijat závěr o vhodnosti této metody.

- Navržení hlavního experimentu
- Provedení hlavního experimentu
- Vyhodnocení provedeného experimentu
- Provedení numerického modelu stejných parametrů jako experiment
- Porovnání výsledků s údaji z numerického modelu
- Porovnání teplot získaných z numerického modelu a naměřených teplot během procesu
- Provedení MMM měření povrchu nástrojů a určení vhodnosti metody pro zjišťování životnosti tvářecích nástrojů
- Návrh opatření zpřesňující dosažené výsledky na základě provedeného experimentu

Práce by měla přispět k rozšíření znalostí v oblasti predikce životnosti nástrojů. Také by měla navrhnout a ověřit experiment, pomocí kterého by se mohly hodnotit jednotlivé nástrojové materiály.

## 4 Příprava experimentu

### 4.1 Zkušební stroj ZD 40

Experiment proběhne na stroji od německé firmy WPM Leipzig – Testing machines. Jedná se o kombinovaný zkušební stroj pro zkoušky tahem a tlakem, konkrétně ZD 40 (obrázek 4.1).

Stroj je pravidelně kalibrován, disponuje propojením s počítačem, na kterém je pomocí softwaru možné sledovat a zaznamenávat jednotlivé veličiny (tlak, posuv, čas atd.).

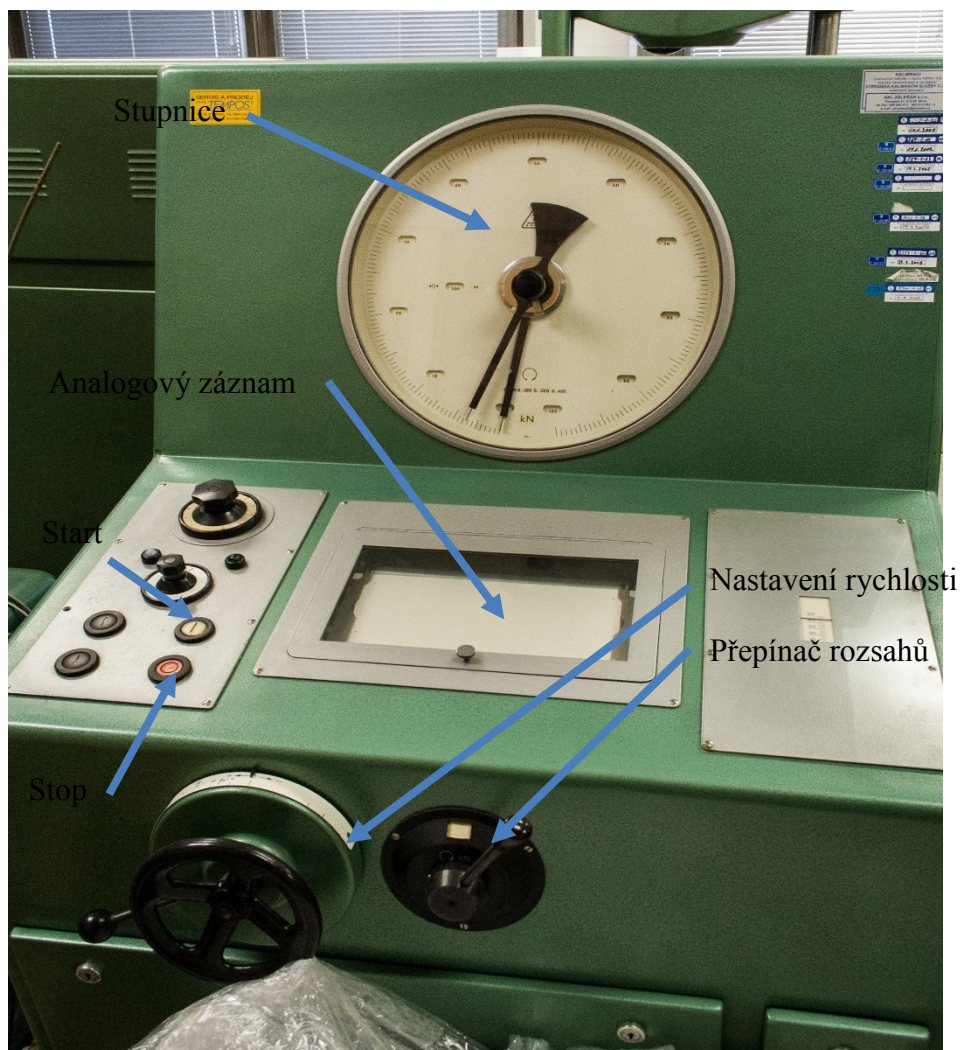


Obrázek 4.1: Celkový pohled na kombinovaný hydraulický lis ZD 40

Nevýhodou stroje je nemožnost pracovat s konstantní rychlostí deformace. Stroj si rychlost deformace snižuje dle zatížení stroje i přesto, že se rychlost nastaví v počátku. Na stroji lze snadno zjistit maximální vyvinutou sílu. Stupnice obsahuje dvě šipky, kdy jedna ukazuje aktuální velikost síly a druhá šipka ukazuje maximální vyvinutou sílu.

V původní verzi přístroje byl stroj vybaven analogovým záznamem na milimetrový papír, kam se zaznamenávaly všechny naměřené údaje pro pozdější detailní analýzu. Nyní je stroj modernizován a zařízení pro zápis hodnot nahradilo PC.

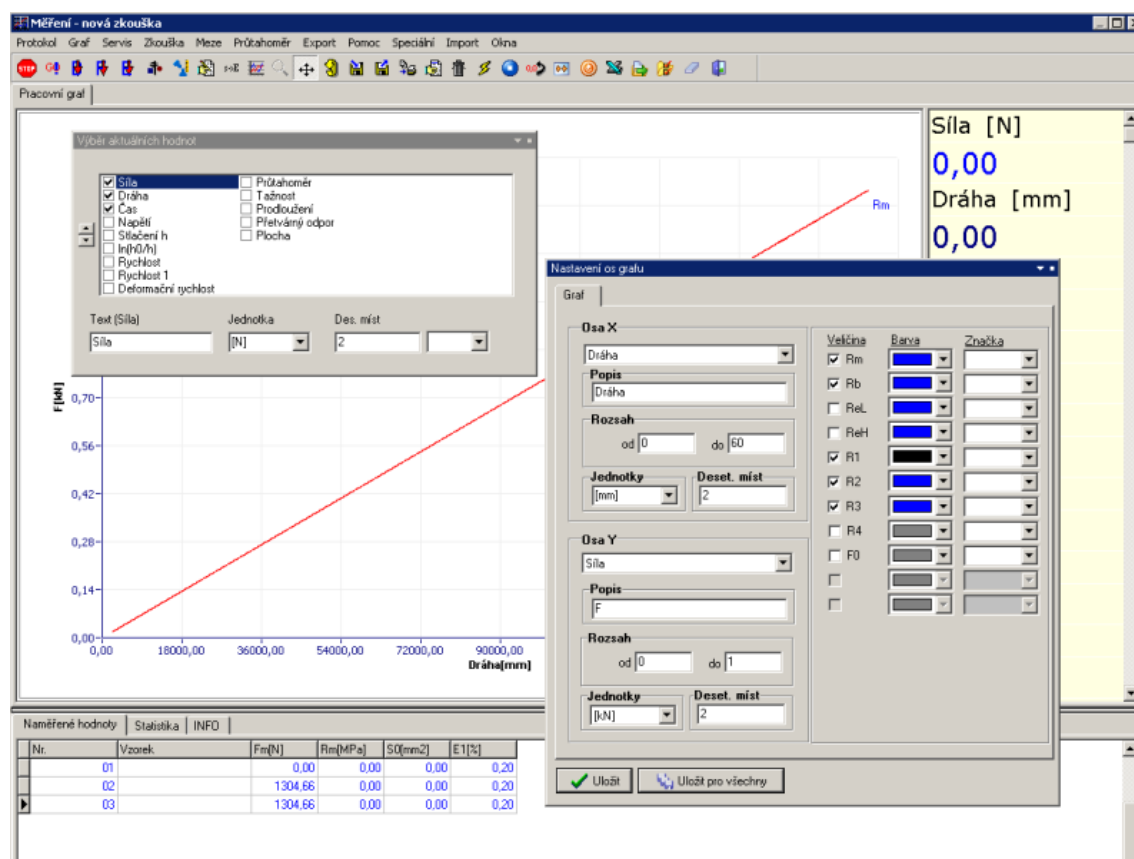
Lis ZD 40 je vybaven rozhraním Spider, které převádí analogové údaje do digitální podoby a přenáší je do PC. Díky tomuto zdigitalizování je možné sledovat v reálném čase mnoho údajů, zároveň je snadnější data zpracovávat.



Obrázek 4.2: Detail ovládacího pultu

Rozhraní Spider je ovládán pomocí softwaru firmy Tempos s.r.o. M-Test. Základní vlastnosti softwaru:

- Všechny údaje jsou uloženy v databázích
- Export dat do obrazových formátů JPG, BMP
- Export zaznamenaných dat do ASCII, html, Word atd.
- Zobrazení vícera křivek v jednom grafu
- Statistické údaje
- Možnost úpravy dle potřeb zákazníka



Obrázek 4.3: Definice nové zkoušky a její nastavení [29]

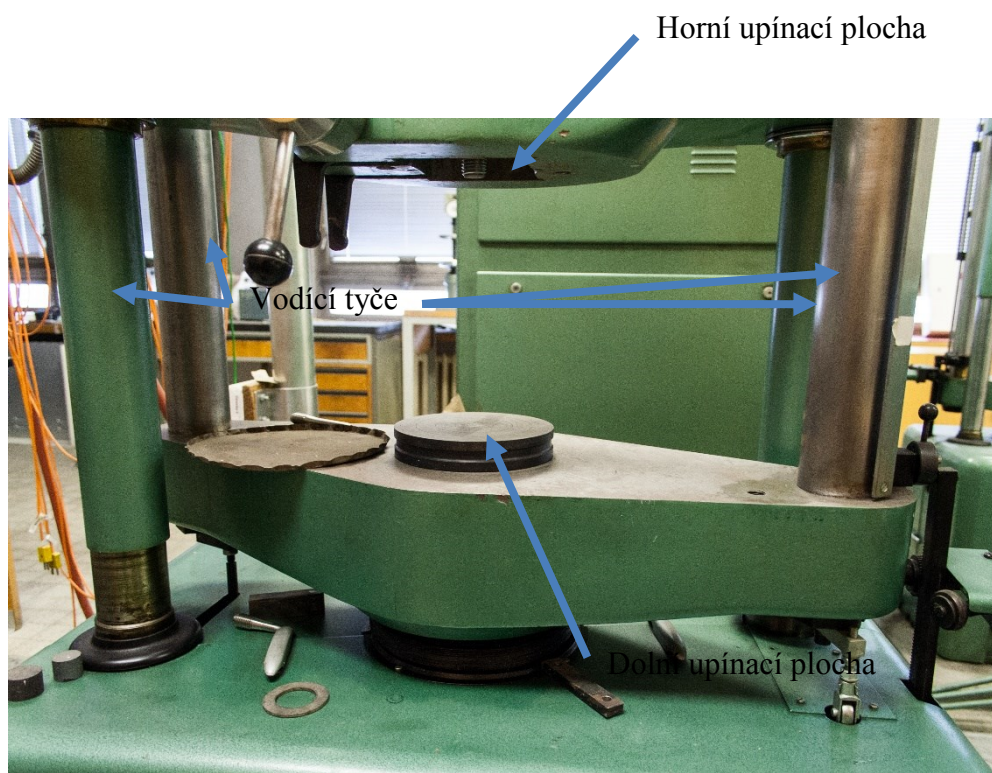


## 4.2 Zkoumané nástroje

Nástroje budou mít tvar čtvercové desky, s opracovanými stykovými plochami. Na nástrojích je vyraženo označení pro identifikaci nástroje a jeho polohy. Bližší informace o zpracování nástroji lze nalézt v příloze v technických výkresech (příloha 13.1 a 13.2).

Spodní nástroj je volně uložen na dolní upínací ploše (obrázek 4.4). Horní nástroj je upevněn na ploše pomocí šroubů (obrázek 4.4) bez přidělané opěrné plochy.

Proti sobě jsou vždy dvě desky z různých materiálů – nástroj. Do nástroje se vloží vzorek. Stroj se spustí, dojde k přiblížení nástrojů a napěchování vzorku. Nástroje se oddálí a vzorek vyjme. Vzorek se umísťuje na značky vytvořené na nástroji.



Obrázek 4.4: Bližší pohled na mechanismus, ve kterém bude umístěn nástroj

## 4.3 Materiály nástrojů a polotovarů

### 4.3.1 Materiál nástroje X210Cr12 (19 436, W. Nr. 1.2080)

Jedná se o vysoce chromovanou ocel s dobrou prokalitelností. Je odolná proti opotřebení. Materiál má vysokou pevnost v tlaku, vhodný pro nástroje s velkou životností - nástroje pro stříhání na lisech, děrování materiálu. Materiál definuje norma DIN EN ISO 4957:2001-02.

Mez kluzu materiálu dosahuje 2 850 MPa. Chemické složení viz tab. 4.1. V zušlechtěném stavu dosahuje tvrdosti 62 HRC.

Tab. 4.1: Chemické složení materiálu nástroje X210Cr12

<i>Chemické složení v %</i>					
C	Mn	Si	Cr	P	S
1,9-2,2	0,2-0,6	0,1-0,6	11,0-13,0	≤0,03	≤0,035

K materiálu existuje mnoho ekvivalentů používaných mimo ČR, viz tab. 4.2.

Tab. 4.2: Ekvivalenty ve světě

<i>Země</i>	<i>Standard</i>	<i>Označení</i>
Čína	GB/T 1299	Cr12, T21200
Evropa	ISO 4957	X210Cr12
Indie	IS 1570	XT215Cr12, TAC22
	IS 4430	XT215Cr12
	IS 13387	T210Cr54
Rusko	GOST 5950	Ch
Severní Korea	KS D 3753	STD1
Japonsko	JIS G 4404	SKD1
USA	ASTM A 681	D3

### 4.3.2 Materiál nástroje 60WCrV7 (19 735, W. Nr. 1.2550)

Chrom-wolfram-křemík-vanadová ocel je vhodná pro práci za studena, ke kalení se střední prokalitelností. Materiál má velmi vysokou houževnatost a odolnost proti dynamickému namáhání, opotřebení. Používá se na nástroje pro prostřihování a děrování materiálu za studena, pro materiály vyšších pevností, nůžky, nástroje pro ražení složitých tvarů. Materiál definuje norma DIN EN ISO 4957:2001-02.

Označení materiálu 60WCrV7 je v literatuře předkládáno jako materiál 19 735 nebo materiál 19 735.

Mez kluzu materiálu dosahuje 1 800 MPa. Chemické složení viz tab. 4.3.

Tab. 4.3: Chemické složení materiálu nástroje 60WCrV7

<i>Chemické složení v %</i>								
C	Mn	Si	Cr	W	V	Ni max.	P max.	S max.
0,55- 0,65	0,15- 0,40	0,45- 0,75	1,0-1,3	1,8-2,3	0,10- 0,25	0,25	0,03	0,035

K materiálu existuje mnoho ekvivalentů používaných mimo ČR, viz tab. 4.4.

Tab. 4.4: Ekvivalenty ve světě

<i>Země</i>	<i>Standard</i>	<i>Označení</i>
Čína	GB/T 1299	6CrW2Si, T40126
Evropa	ISO 4957	60WCrV8
Rusko	GOST 5950	6ChW2S
USA	AISI	S1
	ASTM A 681	S1
	SAE	S1
	UNS	T41901



### 4.3.3 Tvářený materiál 16MnCr5 (14 220, W. Nr. 1.7131)

Nízkolegovaná chrom-manganová konstrukční ocel je vhodná pro cementování. Materiál se používá na konstrukce mostů, součásti tepelných energetických zařízení a součásti tlakových nádob. Materiál je definován normou DIN EN 10084:2008-06.

Materiál je ve stavu žíhaném naměkko (14 220.3). Mez pevnosti  $R_m = 440 \div 930 \text{ MPa}$ ,  $R_e = 333 \text{ MPa}$ . Chemické složení viz tab. 4.5. Materiál je dodán v tyči o průměru 12 mm.

Tab. 4.5: Chemické složení tvářeného materiálu 16MnCr5

<b>Chemické složení v %</b>					
C	Mn	Si	Cr	P	S
0,14-0,19	1,10-1,30	≤0,40	0,80-1,10	≤0,025	≤0,035

K materiálu existuje mnoho ekvivalentů používaných mimo ČR, viz tab. 4.6.

Tab. 4.6: Ekvivalenty ve světě

<b>Země</b>	<b>Standard</b>	<b>Označení</b>
Čína	GB/T 3077	15CrMn, A22152, 20CrMn, A22202,
	GB/T 5216	20CrMnH, 20CrMnAH, A22205, A22207
Evropa	EN 10084	16MnCr5
Indie	IS 4432	16Mn5Cr4(-S)
	IS 5489	17Mn5Cr4
	IS 11952	17Mn5Cr4
Rusko	GOST 4543	18ChG
USA	ASTM A 29, ASTM A 434, AISI, SAE	5115
	ASTM A 521, AISI, SAE	5117
	UNS	G51150, G51170

Materiál bude dělen pomocí hrotového soustruhu na jednotlivé špalíčky.

Pro určení výšky vzorku není dán žádný předpis. Vyjdu-li z praxe, existuje norma pro pēchovací zkoušky, která zohledňuje možnost ohybu vzorku během pēchování. Dle normy ČSN 420426 (1984-01) by výška vzorku neměla překročit 2,5 násobek průměru vzorku, jinak by mohlo dojít během pēchování i k jeho ohnutí. Norma zavádí tzv. předepsaný pēchovací poměr  $D_r$ . Vztah pēchovacího poměru a počátečních rozměrů viz rovnice (16). Pro snazší představu jednotlivých zamýšlených rozměrů vzorků viz obrázek 4.5.

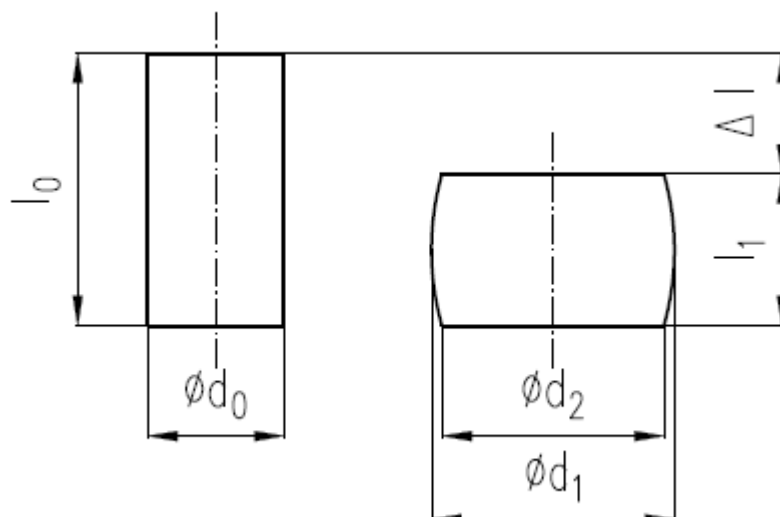
$$D_r = \frac{l_0}{d_0} \quad (16)$$

$$D_r = \frac{l_0}{d_0} \Rightarrow l_0 \leq d_0 \cdot D_r \quad (17)$$

Legenda k rovnici (16) a (17):

- $D_r$  Pēchovací poměr [-]
- $l_0$  Počáteční výška vzorku [mm]
- $d_0$  Počáteční průměr vzorku [mm]

Vytknutím počáteční výšky vzorku z rovnice (16) dostanu novou rovnici (17). Dosazením do této rovnice počátečních rozměrů dostanu maximální povolenou výšku vzorku. Pro tento materiál je maximální povolená výška 30 mm. Norma pro mě není závazná a volím výšku vzorku 22 mm.



Obrázek 4.5: Okótovaný rozměr vzorků

Jelikož je potřeba určit mez, na kterou budou vzorky lisovány, rozhodl jsem se určit konečnou výšku vzorku dle rovnice (19).

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \quad (18)$$

Pro určení velikosti zmáčknutí vzorku, použiji rovnici (16) pro skutečnou (logaritmickou) deformaci, z které vytknu neznámou  $l_1$ , což je hodnota výšky vzorku po deformaci. Jako vstupní údaje budou výška vzorku před deformací a Eulerovo číslo (konstanta).

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \Rightarrow l_1 = \frac{l_0}{e^\varepsilon} \quad (19)$$

Legenda k rovnici (18) a (19):

- $\varepsilon$  Skutečná (logaritmická) deformace [-]
- $l_0$  Počáteční výška vzorku [mm]
- $l_1$  Konečná výška vzorku [mm]
- $e$  Eulerovo číslo (základ přirozených logaritmů) [1]

Do rovnice dosadím počáteční výšku vzorku, Eulerovo číslo a velikost skutečné deformace (uvažuji že  $\varepsilon = 1$ ). Výsledná hodnota 6,62 mm nám udává výšku vzorku po deformaci.

Vznikl tedy zkušební váleček o rozměrech  $\varnothing 12 \times 22$  mm. Tento vzorek se bude pěchovat/lisovat na výšku cca 6,6 mm viz obrázek 4.6. Na obrázku jsou dva vzorky po lisování a polotovary. Jeden ilustrační vzorek (zde na obrázku vlevo) je s prasklinou, která vznikla po deformaci. Vpravo vzorek bez prasklin.



Obrázek 4.6: Vzorek před a po tváření z materiálu 16MnCr5

#### 4.3.4 Tvářený materiál S355J2G3 (11 523, W. Nr. 1.0570)

Nelegovaná konstrukční ocel. Materiál je vhodný pro tváření za tepla, po žíhání naměkko je vhodný i na tváření za studena. Materiál je dobře obrobitelný a svařitelný. Materiál definuje norma DIN EN 10250-2:1992-12.

Materiál je ve stavu žíhaném naměkko. Mez pevnosti  $R_m = 490 \div 630 \text{ MPa}$ ,  $R_e = 333 \text{ MPa}$ . Materiál je dodán o průměru 15 mm. Chemické složení viz tab. 4.7. Hliník, vanad a niob smí být příměsí za účelem regulace velikosti zrn. Ostatní prvky nespecifikované v tab. 4.1 nesmějí být přidány do taveniny bez souhlasu odběratele.

Tab. 4.7: Chemické složení tvářeného materiálu S355J2G3

<i>Chemické složení v %</i>									
Al	C	Cr	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	Cr+Mo+No
≥0,02	≤0,22	≤0,3	≤1,6	≤0,08	≤0,30	≤0,035	≤0,035	≤0,55	≤0,48

Materiál bude dělen pomocí hrotového soustruhu na jednotlivé špalíčky. Za použití stejných rovnic (16) a (17), dosazením správných hodnot, vypočtu maximální vhodnou délku vzorku. Volím vzorek o délce 27 mm.

Konečnou výšku vzorku vypočtu podle rovnic (18) a (19). V tomto případě vychází konečná výška vzorku 8,09 mm.

Vznikl tedy zkušební váleček o rozměrech Ø 15x27 mm. Tento vzorek se bude přechovat/lisovat na výšku 8,1 mm viz obrázek 4.7. Na obrázku je vidět odlisovaný vzorek a polotovár. Během lisování všech zkušebních válečků se nevyskytovaly praskliny.



Obrázek 4.7: Vzorek před a po tváření z materiálu S355J2G3

## 4.4 Zařízení pro termovizní měření teploty

Během tváření jednotlivých vzorků byla měřena teplota tvářeného polotovaru, a jeho ověření probíhalo pomocí výpočetního programu. Výsledky měření podaly velmi zajímavý obraz o skutečném procesu a procesu numericky modelovaném. Rozdíl naměřených teplot by v některých případech mohl znamenat významnou diferenci v konečných vlastnostech produktu, které by se lišily od původně požadovaných vlastností.

Při měření byla použita termokamera Ti55 (obrázek 4.8) od výrobce Fluke. Mezi hlavní přednosti této termokamery patří vysoké rozlišení, citlivost, automatické zarovnání optického a infračerveného snímku (paralaxní korekce) atd.



Obrázek 4.8: Termokamera Fluke Ti55 [23]

Přístroj umožňuje měření teplot od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  s přesností teplot  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  nebo 2% při  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Přístroj dovoluje provádět korekce emisivity na displeji, kompenzaci odražené teploty pozadí na obrazovce a korekci přenosu na obrazovce.

Snímanou oblast je možné rozšířit/zúžit změnou objektivu. Objektivy jsou plně manuální a je nutno ostřit ručně.

Pro přenos dat do PC je možno použít paměťovou kartu, na kterou se zaznamenávají data ve zvoleném formátu, ať rastrovém nebo speciálním is2. Is2 obsahuje radiometrické, infračervené a související optické snímky. [24]

Abych omezil vliv povrchu vzorků na měření, nabarvím snímané vzorky barvou „Tetenal kameralack Senotherm typ 1653.“, která má definovanou emisivitu. Korekce nastavím přímo v zařízení.

## 4.5 Zařízení pro měření intenzit magnetického pole

Pro tuto kapitolu bylo čerpáno z literatury [25][26].

Nedestruktivní metoda, spočívající v měření a analýze rozložení zbytkových magnetických polí v kovových materiálech. Metoda využívá technologickou historii materiálu, kde se určí tzv. SCZ – Stress Concentration Zones, poruchy a heterogenity v mikrostruktuře. Magnetická paměť vzniká v materiálu během jeho výroby, tepelné zpracování ohýbání, tváření atd., ve formě zbytkové magnetizace.

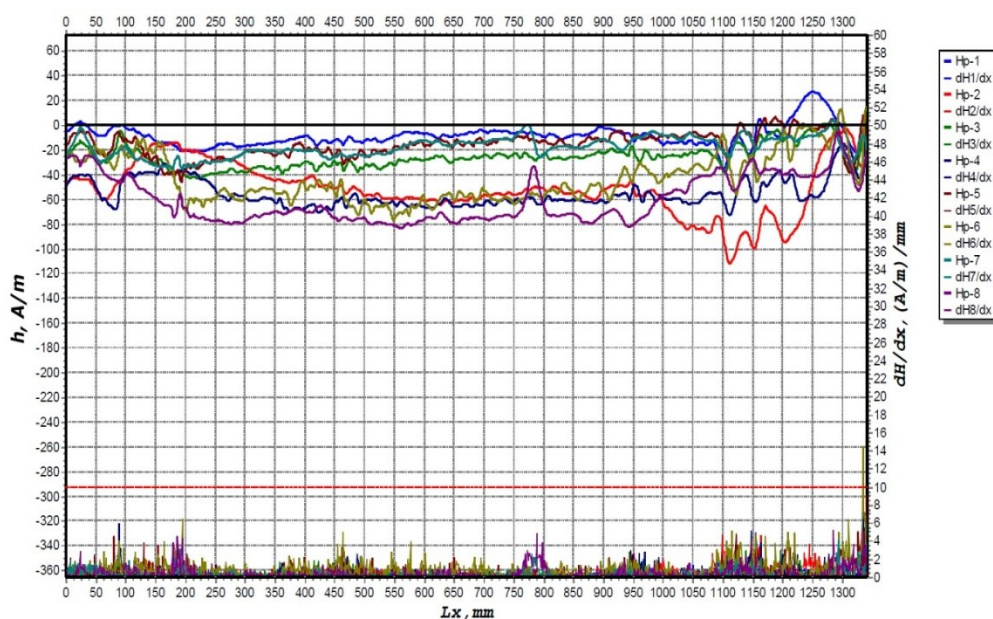
Samotné měření probíhá velmi zjednodušeně tak, že se snímačem přejíždí přes kontrolované místo (obrázek 4.9). Přejetí se provádí jednou až vícekrát, dle počtu měřících sond a požadované šířky záběru. Zařízení je vybaveno displejem, kde můžeme zobrazit skenované hodnoty intenzity  $H_p$ , nebo gradient magnetického pole  $dH_p/dx$  (graficky nebo číselně).

Protože zkoumané desky (nástroje) jsou velmi malé a není možné použít tento typ měřící sondy, bude pro informativní účely odmontována jedna měřící sonda a tou bude zkoumán povrch (obrázek 4.9). Naměřené hodnoty budou pouze informativní – nebudou korespondovat s lokací případné vady na nástroji. Přístroj je nastaven do tzv. timer módu, kdy odečet hodnot je prováděn po určité době. Tato doba je uživatelsky nastavitelná.



Obrázek 4.9: Demontovaná sonda při měření

Zařízení zobrazuje naměřené údaje ihned, a je možné provést detailnější skenování místa s poruchou. Výstup měření je ve formě tzv. magnetografu – obrázek 4.10.



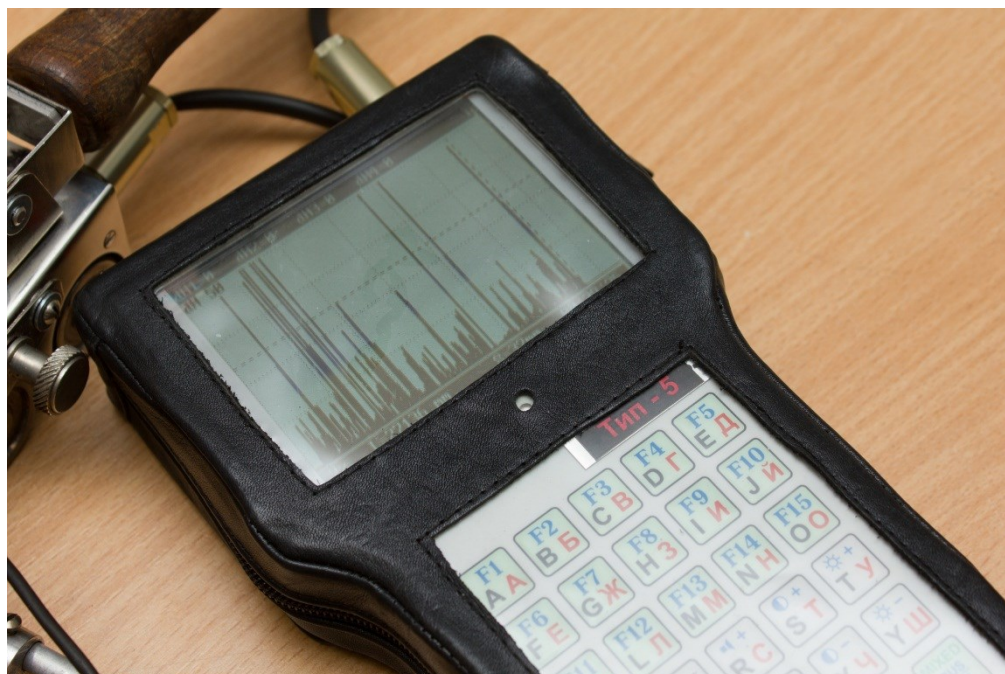
Obrázek 4.10: Ukázka dobrého magnetografu svarového spoje [25]



Nevýhodou metody je omezení pouze na magnetické materiály. Není vhodné měřit v blízkosti cizích magnetických předmětů, popřípadě externího magnetického pole do 1 m.

Výhodou je nedestruktivnost, rychlost měření, možnost měřit i za provozu. Není potřeba provádět úpravu povrchu měřeného materiálu. Není ovlivněna vibracemi. Metoda MMM umožní včasné diagnostikování únavového poškození.

Měření bude provedeno pomocí přístroje TSC-3M-12 (obrázek 4.11). Zařízení je vícekanálové, a umožňuje měření hodnot intenzity magnetického pole až do rychlosti 0,5 m/s. Dle výrobce hodnota napětí vyšší než 30 A/m/mm indikuje trhlinu.

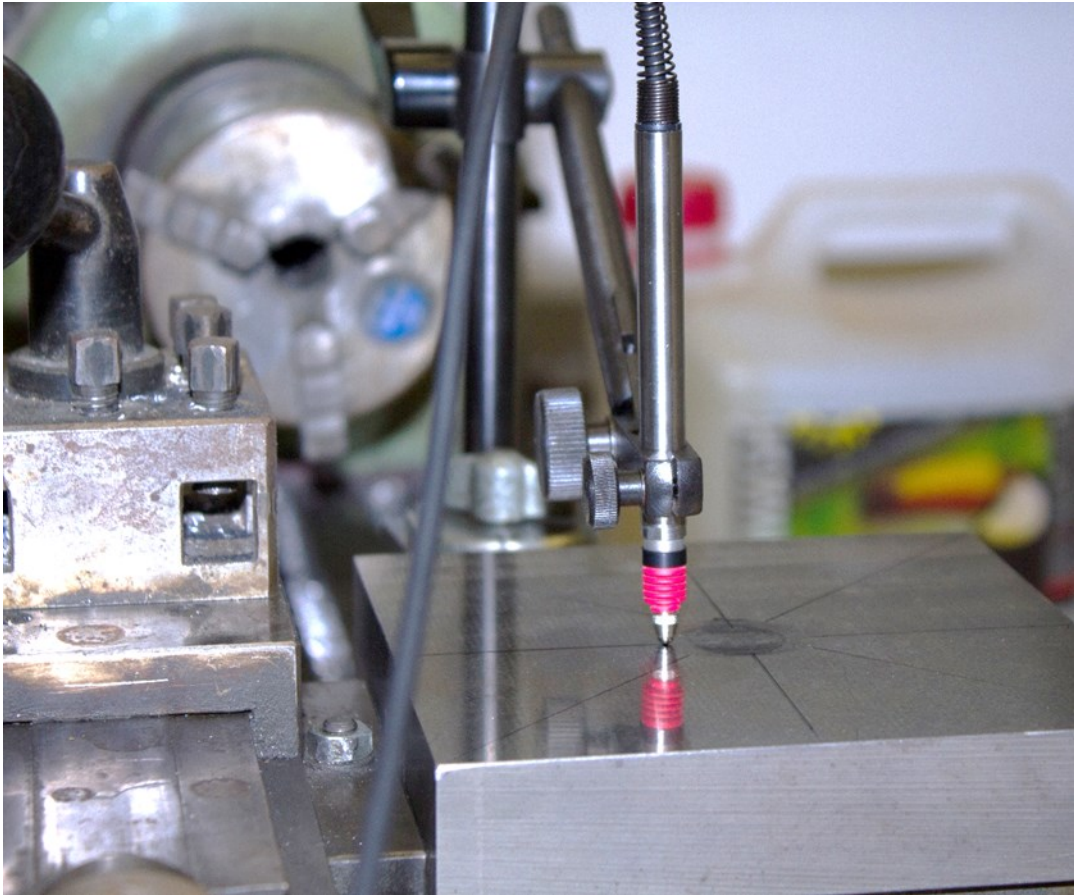


Obrázek 4.11: Vyhodnocovací zařízení TSC-3M-12

## 4.6 Zařízení pro měření úbytků povrchových vrstev Millimar

Pro měření úbytku povrchových vrstev bylo použito přístroje firmy Mahr s.r.o. Tento přístroj se skládá z elektronického délkoměru s LCD a samotné sondy, která slouží k měření.

Protože bylo potřeba měřit bodově jednotlivé údaje, sondu jsem přichytil na soustruh pomocí magnetického stojánu. Nástroj (deska) byla na suportu, pomocí kterého docházelo k pohybu měřené desky vůči měřicí sondě (obrázek 4.12).



Obrázek 4.12: Měřicí řetězec při snímání, na obrázku měřicí sonda P2004

Měřicí zařízení je propojeno s PC, kde pomocí instalovaného softwaru firmy Mahr s.r.o. dochází k automatickému odečtu naměřených hodnot po pevně daných intervalech. Pomocí nonia na příčném suportu se posunuje měřenou deskou po celém měřeném rozsahu. Naměřené údaje jsou ukládány do Excelu, to umožní rychlejší a efektivnější zpracování naměřených dat.

Takto jsou měřeny jednotlivé desky v  $0^\circ$  a  $90^\circ$  po 10 přechovacích cyklech. Vzdálenost mezi jednotlivými měřenými body je 0,1 mm.

#### 4.6.1 Elektronický délkoměr C1208

Pro tuto kapitolu je čerpáno z literatury [27].

Jedná se o kompaktní přístroj (obrázek 4.13), vybavený velkým a přehledným displejem, který je podsvícený. Přístroj je vybaven pěti signálními led světly, které indikují, zda je měřený předmět v toleranci.



Obrázek 4.13: Mahr Millimar C1208

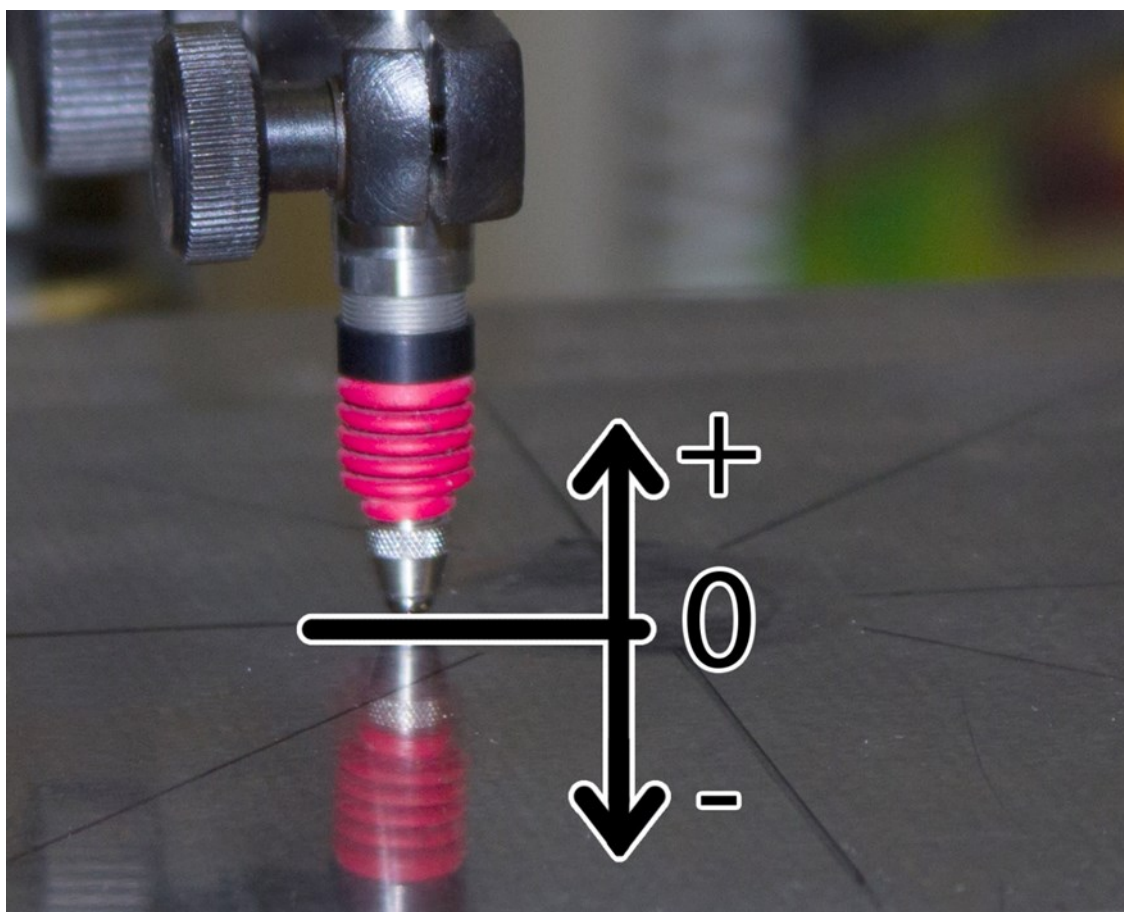
Základní vlastnosti délkoměru:

- Zrychlená volba: nejčastěji používané funkce je možné vybrat tlačítkem SELECT pro zrychlenou volbu
- Statická měření  $\pm A$ ,  $\pm B$  včetně všech kombinací
- Dynamická měření: Max, Min, Max-Min, Max + Min, průměr
- Komunikace přes RS232 interface pomocí softwaru pod MS Windows

Důležitým prvkem měření je orientace odečtených hodnot. Zda, když jde hrot sondy níž, hodnoty klesají, či stoupají. Konfigurace tohoto parametru probíhá pomocí menu



a kláves na přístroji. Nastavení orientace ilustruje obrázek 4.13. Poukazuje na to údaj na display „+C1“. Ten odkazuje na základní nastavení, kdy je orientace shodná - viz obrázek 4.14.



Obrázek 4.14: Orientace naměřených hodnot

#### 4.6.2 Měřicí sonda Millimar P2004

Pro tuto kapitolu jsem čerpal informace z literatury [28].

Zařízení disponuje vysokou linearitou po celém měřicím rozsahu. Pro dosažení dobré citlivosti je spolehlivě elektromagneticky odstíněné. Dostatečný komfort zvyšuje i stupeň krytí IP64. Sonda je odolná proti oleji, benzínu, vodě, alifatickým sloučeninám. Mírně odolná proti kyselinám, zásadám, rozpouštědlům, ozónu. Detail měřicí sondy a jejího uchycení je patrný z obrázku (obrázek 4.12).

Rozsah měření je  $\pm 2$  mm, sonda je bez pohonu s měřicí silou v nulovém bodě  $0,75 \pm 0,15$  N – se základní pružinou, pokud je vyměněná dosahuje jiných sil. Nárůst měřicí síly je 0,2 N/mm.

Tab. 4.8: Charakteristika lineární odchylky měřicí sondy P2004

Rozsah	Odchylka při korigované citlivosti
$\pm 0,1$ mm	-
$\pm 0,5$ mm	0,4 $\mu\text{m}$
$\pm 1,0$ mm	1,5 $\mu\text{m}$
$\pm 2,0$ mm	3,0 $\mu\text{m}$

## 4.7 Korekce měření úbytků povrchových vrstev nástrojů

Odečet hodnot pomocí přístroje Mahr Millimar C1208 (kapitola 4.6.1) a sondy Millimar P2004 (kapitola 4.6.2) byl automatizován, ale posuv materiálu na nové měřicí místo-bod probíhal manuálně. Bylo použito dílenského soustruhu (obrázek 4.15), kde na příčném supportu byl uložen měřený nástroj, pomocí ovládací páky s noniem byl proveden posuv o předem určenou vzdálenost (0,1 mm).



Obrázek 4.15: Celkový pohled na sestavu měření úbytků povrchových vrstev

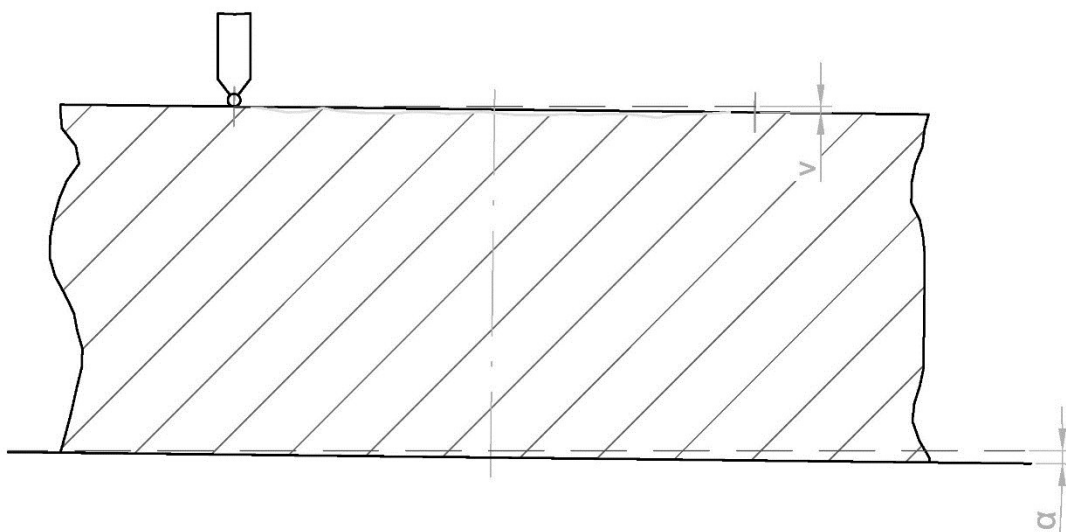
I přes snahu co nejvíce minimalizovat chyby vzniklé měřením bylo potřebné provést opravy naměřených údajů. Nebylo možné zajistit, aby byly všechny roviny rovnoběžné a měření tak probíhalo pod „sklonem“. Data tak byla zkreslena.

Ke korekci dat je možno přistoupit podle dvou úvah. Korekce přes trigonometrické funkce, nebo korekce pomocí poměrů.

Protože matice naměřených hodnot je velká, proběhl ověřovací výpočet v softwaru Microsoft Excel, s porovnáním na geometrickém modelu vytvořeném v softwaru od firmy Autodesk.

#### 4.7.1 Korekce trigonometrická

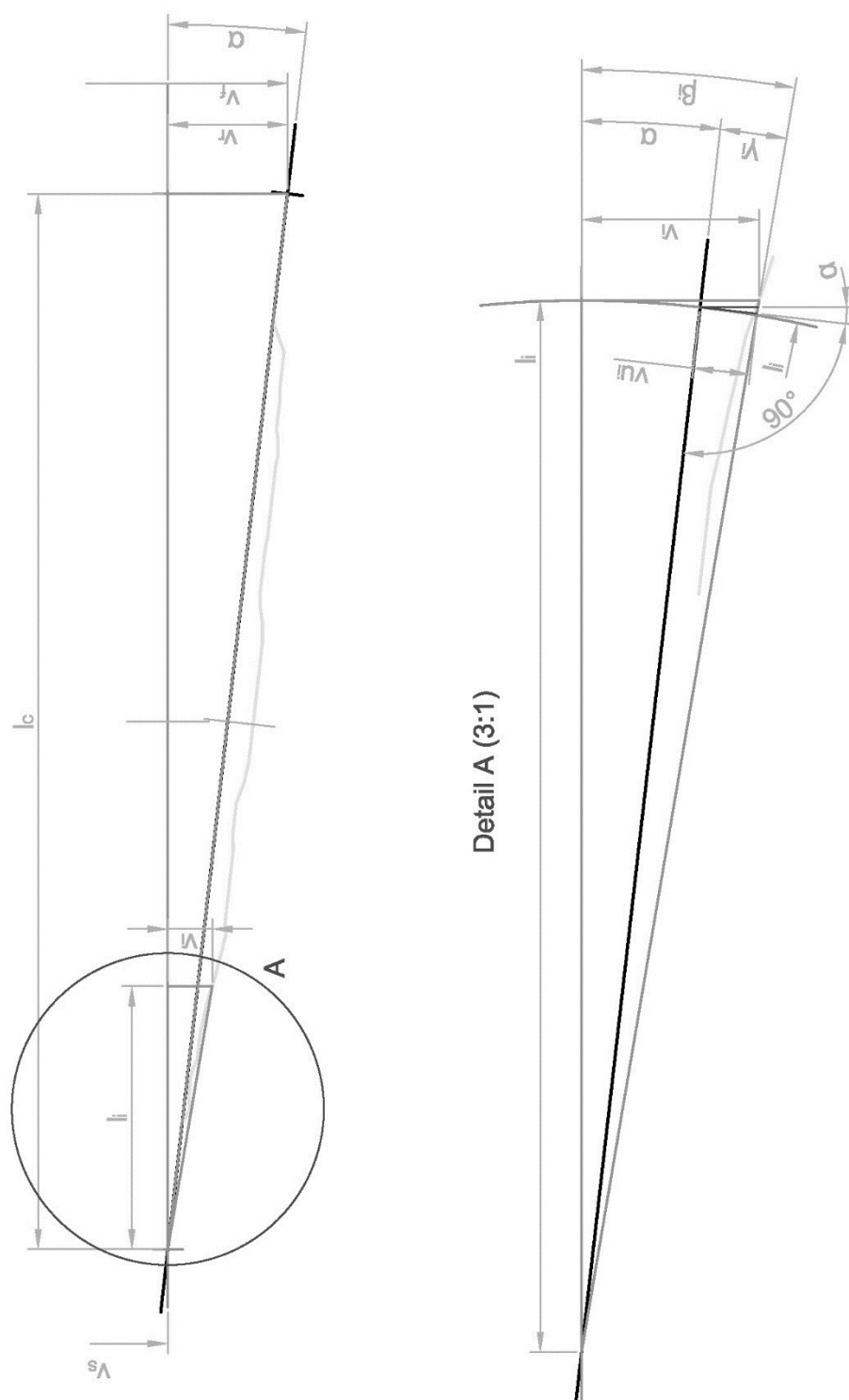
Zásadním problém zde představuje minimální velikost úhlu sklonu desky, je zde prostor pro vznik chyby dané samou podstatou trigonometrických funkcí.



Obrázek 4.16: Schématický náčrt problému

Vlivem náklonu (obrázek 4.16) dochází ke změně měřené velikosti úbytku. V místě, kde nedochází k opotřebení a nástroj by měl být rovný, je naměřen úbytek povrchové vrstvy. Zamezit tomuto jevu je možné pomocí trigonometrického přepočtu.

Z obrázku (obrázek 4.17) je patrné, jak je komplikovaný celý přepočet hodnot. Jak již bylo zmíněno, v přepočtu se jedná o velmi malé odchylky od vodorovné polohy.



Obrázek 4.17: Zjednodušený náčrt problematiky přepočtu pomocí trigonometrických funkcí

Základním předpokladem pro výpočet je, že výška naměřená v prvním a posledním bodě není ovlivněna úbytkem povrchových vrstev. Tedy jsou tyto dva body rovnoběžné.

Legenda k obrázku (obrázek 4.17):

- $l_c$  Celková měřená délka úseku [mm]
- $v_s$  Počáteční naměřená výška [mm]
- $v_f$  Konečná naměřená výška [mm]
- $v_r$  Rozdílná výška od počátku [mm]
- $\alpha$  Úhel sklonu roviny [°]
- $l_i$  Vzdálenost v i-tém bodě měření [mm]
- $ls_i$  Vzdálenost ve sklonu v i-tém bodě měření [mm]
- $v_i$  Změřená výška v i-tém bodě měření [mm]
- $vu_i$  Změřená výška ve sklonu na původní rovinu v i-tém bodě měření [mm]
- $\beta_i$  Úhel sklonu v i-tém bodě [°]
- $\gamma_i$  Úhel sklonu od skloněné roviny v i-tém bodě [°]

Výpočet rozdílné výšky pak spočítáme jako rozdíl prvního měřeného bodu a posledního (rovnice (20)). Úhel sklonu roviny již využívá goniometrických funkcí, viz rovnice (21). Úhel sklonu v i-tém bodě (rovnice (22)) a úhel sklonu od skloněné roviny v i-tém bodě se vypočítá dle rovnice (23).

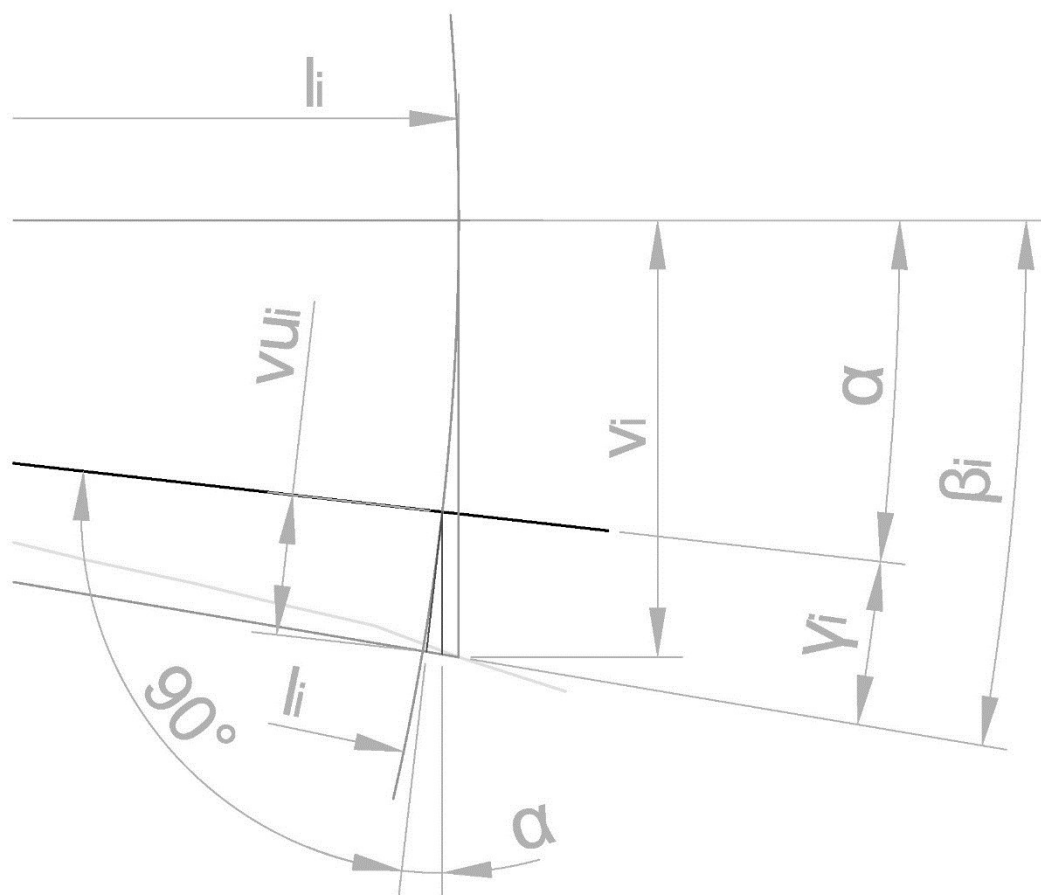
$$v_r = v_s - v_f \quad (20)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{v_r}{l_c}\right) \quad (21)$$

$$\beta_i = \arctg\left(\frac{v_i}{l_i}\right) \quad (22)$$

$$\gamma_i = \beta_i - \alpha_i \quad (23)$$





Obrázek 4.18: Detailní pohled na trigonometrický problém přepočtu

Dle obrázků (obrázek 4.17 a obrázek 4.18) pak dopočítáme korigovanou velikost úbytku povrchové vrstvy.

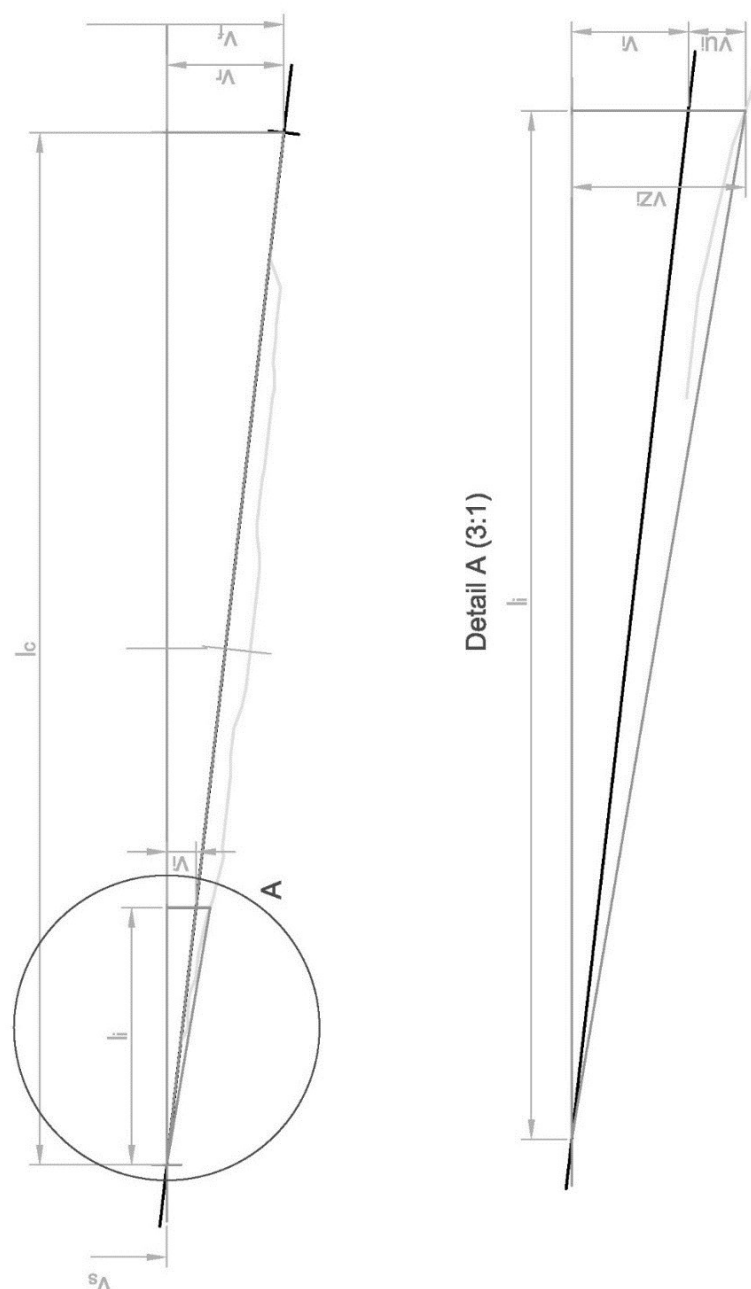
Změřená výška ve sklonu na původní rovinu v  $i$ -tém bodě měření se vypočítá pomocí rovnice (24).

$$vu_i = l_i \cdot \operatorname{tg}(\gamma_i) = l_i \cdot \operatorname{tg}(\beta_i - \alpha_i) \quad (24)$$

Výhodou tohoto způsobu je přepočet pro bod v dané vzdálenosti. Nevýhody plynou z přesnosti funkcí trigonometrických, zejména funkce tangens. Další omezení plynou z architektury výpočetní techniky, při výpočtu je potřeba pracovat na patnáct a více desetinných míst pro dostatečnou přesnost výpočtu.

### 4.7.2 Korekce poměrová

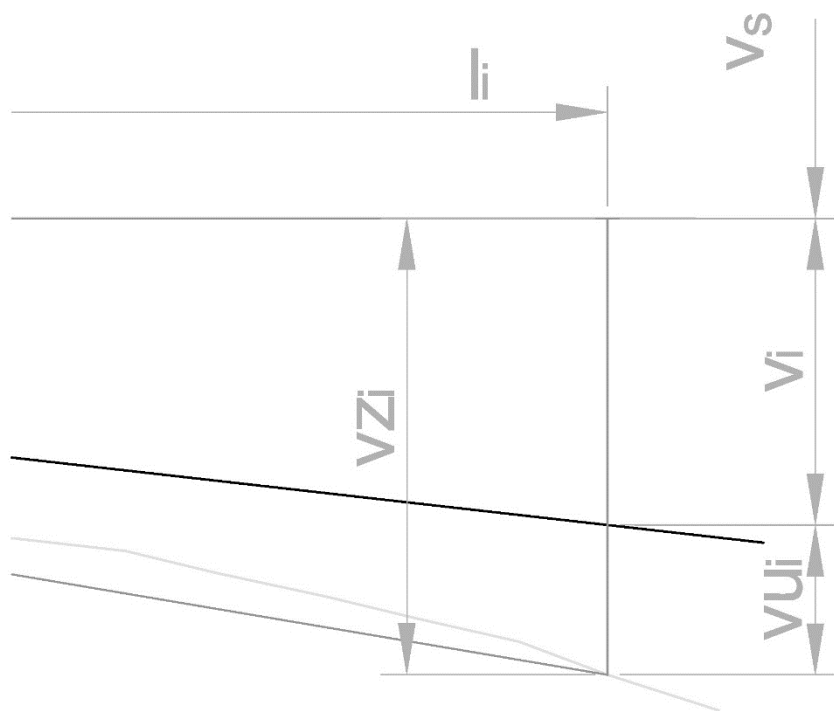
Korekce úbytku povrchových vrstev pomocí poměru je na podobném principu s tím rozdílem, že se zde místo trigonometrických funkcí používá poměrový výpočet. Nevýhodou tohoto přepočtu je, že spočítaná vzdálenost není přesně v místě měření, ale je posunuta.



Obrázek 4.19: Nákres problematiky přepočtu pomocí poměrů

Legenda k nákresu problematiky přepočtu pomocí poměrů (obrázek 4.19):

- $l_c$  Celková měřená délka úseku [mm]
- $v_s$  Počáteční naměřená výška [mm]
- $v_f$  Konečná naměřená výška [mm]
- $v_r$  Rozdílná výška od počátku [mm]
- $l_i$  Vzdálenost v i-tém bodě měření [mm]
- $v_i$  Rozdíl výšky v i-tém bodě měření od počáteční  
naměřené výšky [mm]
- $vz_i$  Změřená výška v i-tém bodě měření [mm]
- $vu_i$  Přepočtená výška i-tém bodě měření [mm]



Obrázek 4.20: Detailní pohled na přepočet pomocí poměrů

Výpočet rozdílné výšky je shodný s trigonometrickou korekcí, zde zapsáno v rovnici (25). Změna nastává při výpočtu výšky v i-tém bodě měření od počáteční naměřené výšky. Zde se již uplatnil poměrový princip, který je zachycen v další rovnici (26).

$$v_r = v_f - v_s \quad (25)$$

$$v_i = \frac{v_r}{l_c} \cdot l_i \quad (26)$$

Konečný výpočet přepočtené výšky v i-tém bodě měření je vypočten dle rovnice (27).

$$vu_i = vz_i - v_i + v_s = vz_i - \left( \frac{v_r}{l_c} \cdot l_i \right) + v_s = vz_i - \left( \frac{v_f - v_s}{l_c} \cdot l_i \right) + v_s \quad (27)$$

## 4.8 Zařízení pro měření úbytků povrchových vrstev LSCM

Měření bylo prováděno třetí stranou, na mikroskopu typu LSCM.

LSCM = Confocal Laser Scanning Microscope v doslovném překladu se jedná o laserový rastrovací konfokální mikroskop.

Měření bylo provedeno na stroji firmy Olympus. Data měření jsou k dispozici v několika formátech. Nejvhodnější formát dat pro další analýzu je csv. Jedná se o verzi záznamu dat, které můžeme použít v Excelu – v podstatě to jsou data oddělená jednoznačně definovaným znakem. Mezi dalšími dostupnými výstupy je formát souborů jpeg (rastrový formát). Poslední možností je speciální soubor OLS – jedná se o formát používaný pro záznam dat z mikroskopu Olympus.

Ve své podstatě jsou data jpeg a csv exportována z tohoto základního OLS souboru.

Zkoumaná oblast je poměrně velká a bylo tak nutno udělat několik snímků povrchu. Máme tedy k dispozici několik souborů jpeg, csv a ols a to pro každý nástroj a ve směru 0° (H) a 90° (V) k značení nástroje.

Obrazy jpeg jsou dodány v rozlišení  $1024 \times 768$  px, což odpovídá  $640 \times 480$   $\mu\text{m}$ . Velikost jednoho pixelu odpovídá  $0,625$   $\mu\text{m}$ . Jednotlivé obrazy je možné sestavit tak, abychom dostali celkový podlouhlý snímek povrchu. Bohužel se jedná o snímky se ztrátovou kompresí a není tak možné zaručit správné spojení souborů.

Pro další vyhodnocování jsou vhodné tedy pouze dva typy souborů `ols` a `csv`. `Ols` soubory je možné otevřít v softwaru firmy Olympus – nemám k dispozici. Druhou alternativou je freeware Gwyddion. `Csv` soubory lze otevřít a zpracovat v softwaru Excel firmy Microsoft. Pro další zpracování použiji data v `csv` formátu. Způsob korekce dat bude stejného způsobu, jako v kapitole 4.7.2 Korekce poměrová.

Získaná data neobsahují pouhou linii, ale celou plochu. Pokud spojím všechny soubory do jednoho, mohu vymodelovat plochu, která bude odpovídat opotřeбенé ploše nástroje.

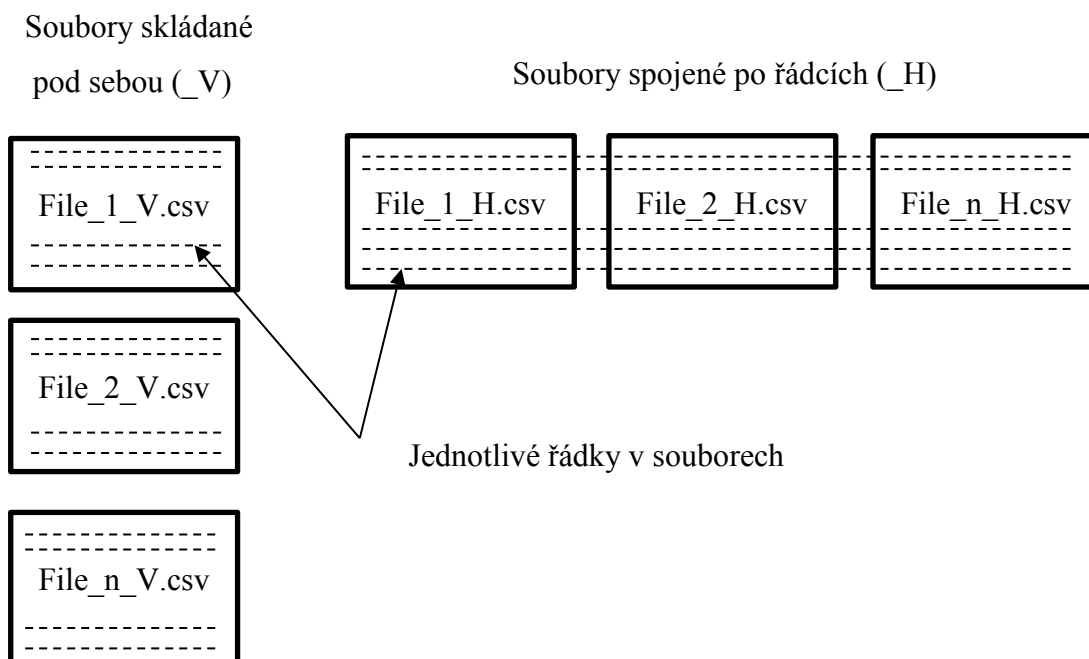
Další překážka, kterou je nutno vyřešit, jsou občasné nulové hodnoty. Pro objasnění nulových hodnot je potřeba uvědomit si samotnou podstatu měření. Jde vlastně o hodnoty, které nebyly změřeny – byly univerzálně nahrazeny nulou. Nulová hodnota tedy znamená prázdné místo, kde nebyly odečteny údaje. Pokud si představíme světelný paprsek, který dopadá na určitý bod v měřeném materiálu, odraz tohoto paprsku nebude směřovat na senzor, tak není možno zjistit hodnotu.

Při modelování plochy nástroje, bych musel řešit celý problém přepočtů již ve 3D prostoru. Navíc celý výpočet by zkomplikovaly nezměřená místa. Další překážkou je omezený přístup k výpočetnímu hardwaru a potřeby návrhu robustních algoritmů pro řešení problému.

Vyzkoušel jsem několik přístupů jak provést přepočty. Sestrojil jsem několik algoritmů, které procházejí zdrojová data a postupnými kroky je upravují a přepočítávají. Nakonec jsem problematiku opotřebované plochy zavrhl a soustředil se na vyšetření průběhu opotřeбенí na linii vybrané z plochy.

Pro liniové vyšetření dat bylo potřeba sloučit jednotlivé soubory dle povahy jejich snímání. Jednotlivé soubory se sloučili pod sebou tak, jak byly snímány (nejjednodušší varianta), nebo se napojily po řádcích (za sebou). Napojení po řádcích bylo nejkomplikovanější, např. všechny první řádky ze všech souborů se pospojovaly

postupně do jednoho dlouhého řádku, to se opakovalo pro všechny řádky souboru. Pro lepší názornost viz obrázek 4.21.



Obrázek 4.21: Schéma spojování dat

Spojení souborů pod sebou bylo provedeno pomocí základního příkazu MS DOS. Příkaz copy byl modifikován podle typu zpracovávaného souboru, např.: „*copy 19436-1\_V\_\*\_ProfileData.csv 19436-1\_V\_sloucenno.csv*“. Tento příkaz sloučil všechny soubory dle zadané masky do výsledného souboru 19436-1\_V\_sloucenno.csv. Výsledný spojený soubor pod sebou bylo potřeba očistit od nadbytečných dat, které jsou v každém souboru. To bylo prováděno manuálně za pomoci filtrů v softwaru Microsoft Excel. S tímto souborem bylo možné již dále pracovat.

Sloučení po řádcích bylo obtížnější. Pro jejich spojení jsem použil PHP server s vlastním skriptem, který separoval nadbytečná data a sloučil jednotlivé soubory do jednoho. Skript otevřel všechny soubory zároveň, vynechal nadbytečná data a jednotlivé i-té řádky ze všech souborů spojil do jednoho i-tého řádku. Správnost jsem ověřil ručním porovnáním jednoho spojeného souboru a dvou zdrojových. Soubor takto vzniklý nelze v Excelu otevřít. Obsahuje příliš mnoho sloupců. Data jsem transponoval pomocí makra. Takto upravený soubor bylo již možné dále zpracovat.

## 5 Naměřená data

Nástroje se měřily shodným způsobem. Jedna sada nástrojů (horní a dolní část nástroje) se skládá ze dvou různých materiálů. Na každé sadě nástrojů se lisoval jiný materiál vzorku. Tím jsem docílil nízkého počtu odlisování vzorků a co nejširšího možného objemu získaných údajů. Po každém odlisování desíti vzorků na sadě nástrojů, se nástroje vyjmuly z lisu a změřily jej. Celý postup se opakoval, dokud nedošlo k vyčerpání všech zkušebních vzorků pro daný experiment.

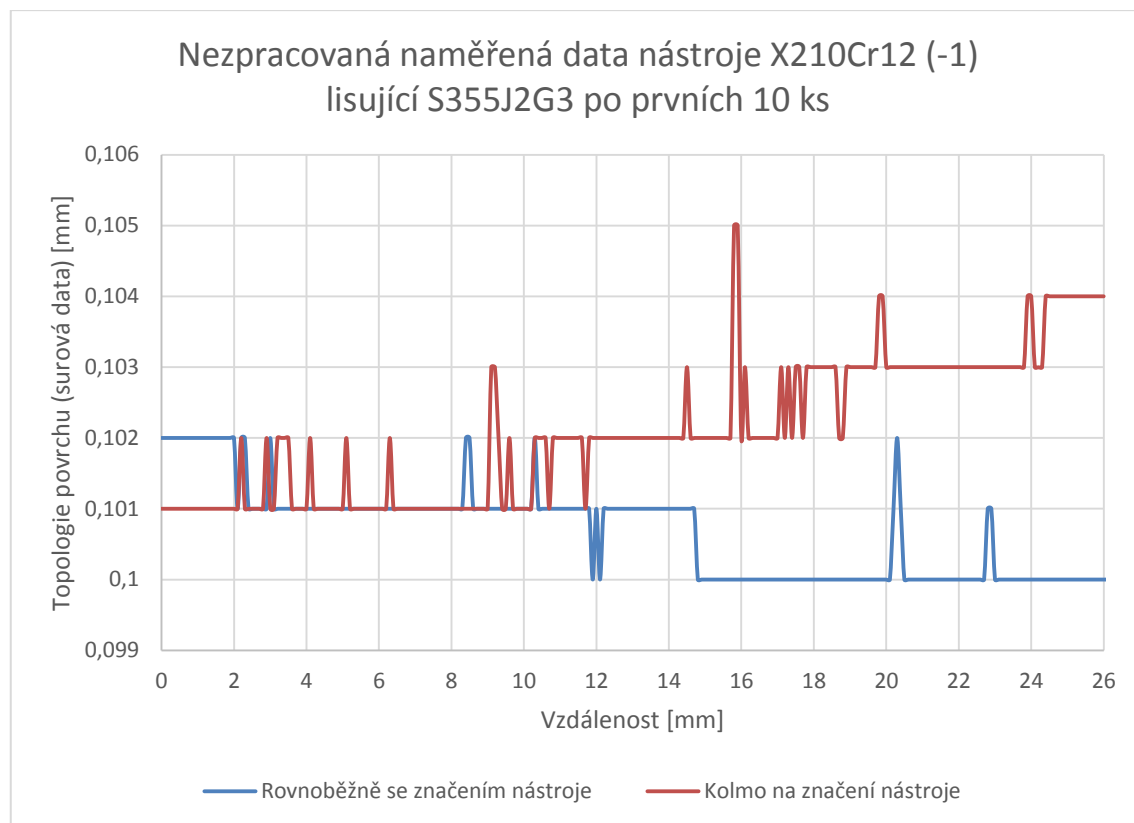
Výsledkem každého měření byly naměřené údaje (pro horní a dolní nástroj) o profilu povrchu ve směru rovnoběžném a kolmém na značení nástroje pro jeden typ tvářeného materiálu (vzorku). Sestavy nástrojů a jejich materiálů viz tab. 5.1.

Tab. 5.1: Přehled sestav nástrojů

<i><b>Sada nástrojů</b></i>	<i><b>W. Nr. nástrojů</b></i>	<i><b>W. Nr. Tvářeného polotovaru</b></i>
1	60WCrV7 (1.2550, 19 735)      Horní část	S355J2G3 (1.0570, 11 523) Ø 15x27
	X210Cr12 (1.2080, 19 436)      Spodní část	
2	60WCrV7 (1.2550, 19 735)      Horní část	16MnCr5 (1.7131, 14 220) Ø 12x22
	X210Cr12 (1.2080, 19 436)      Spodní část	

Naměřené hodnoty byly zaznamenány do souboru softwaru Microsoft Excel pomocí měřicího zařízení (kapitola 4.6.1). Měření proběhlo na zařízení zmíněné v kapitole „4.6 Zařízení pro měření úbytků povrchových vrstev“.

Pro přepočet naměřených hodnot bylo využito poměrové korekce dle kapitoly „4.7.2 Korekce poměrová“. Čistá nezpracovaná data a jejich vizualizace (graf 5.1) ilustruje fakt, že by bylo vhodné použít měřidlo alespoň o řád přesnější. Topologie povrchu by tak byla lépe postihnuta. Základní představu o povrchu nám usnadní proložení přímkou grafem. Pro přesnější představu o topologii povrchu je potřeba data dále zpracovat.



Graf 5.1: Nezpracovaná změřená data nástroje X210Cr12 lisující S355J2G3, naměřeno po odlisování prvních 10 ks

V následujících kapitolách jsou znázorněny profily povrchů jednotlivých nástrojů. Jak již bylo zmíněno, data jsou upravena. Vybral jsem pouze pět až šest měřených profilů (po 10, 50, 100, 150, 190 a 230 ks) povrchu pro každý nástroj. Tyto profily jsem upravil dle vybrané metodiky, takto získané profily byly stále špatně čitelné, proto jsem je proložil polynomicou spojnicí trendu nejvyššího řádu (6tého řádu). Pro tuto křivku jsem si zobrazil rovnici s dostatečným počtem desetinných míst (kvůli přesnosti), z této rovnice jsem pak již vykreslil následující grafy. Z výsledků těchto aproximací jsem vyhledal minima, maxima a průměrné údaje o změnách topologie povrchu.

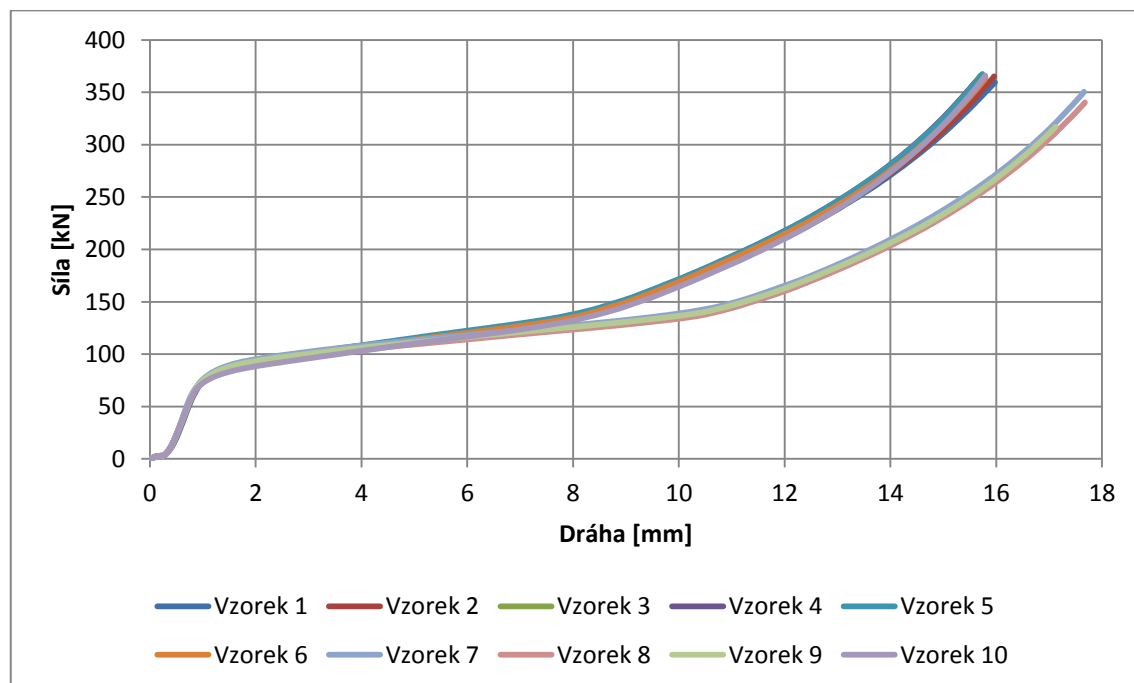


## 5.1 Porovnání dosahovaných sil při tváření materiálů S355J2G3 a 16MnCr5

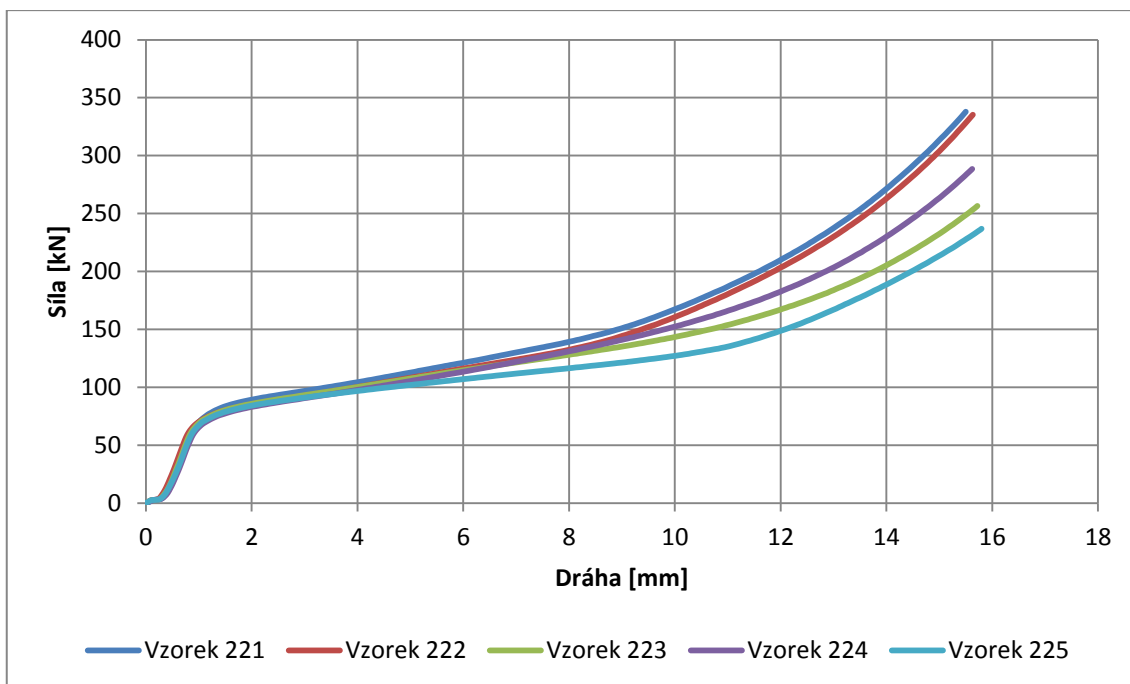
Povrch nástroje bude degradován procesy vznikajícími při tváření, očekávám hlavně abrazivní opotřebení (mechanismy opotřebení viz obrázek 2.1). Předpokládám, že s větším počtem odlisovaných vzorků – polotovarů, bude potřeba vyvinout větší sílu, abychom překonali změněnou morfologii povrchu.

Pokud by byly nástroje (horní a dolní) ze stejného materiálu, mohlo by být možné sestavit závislost narůstající síly a opotřebení za předpokladu homogenity polotovaru. Bohužel sestava nástrojů se vždy skládá ze dvou rozdílných nástrojových materiálů. Bude tedy rozdílná hodnota opotřebení jednotlivých nástrojů.

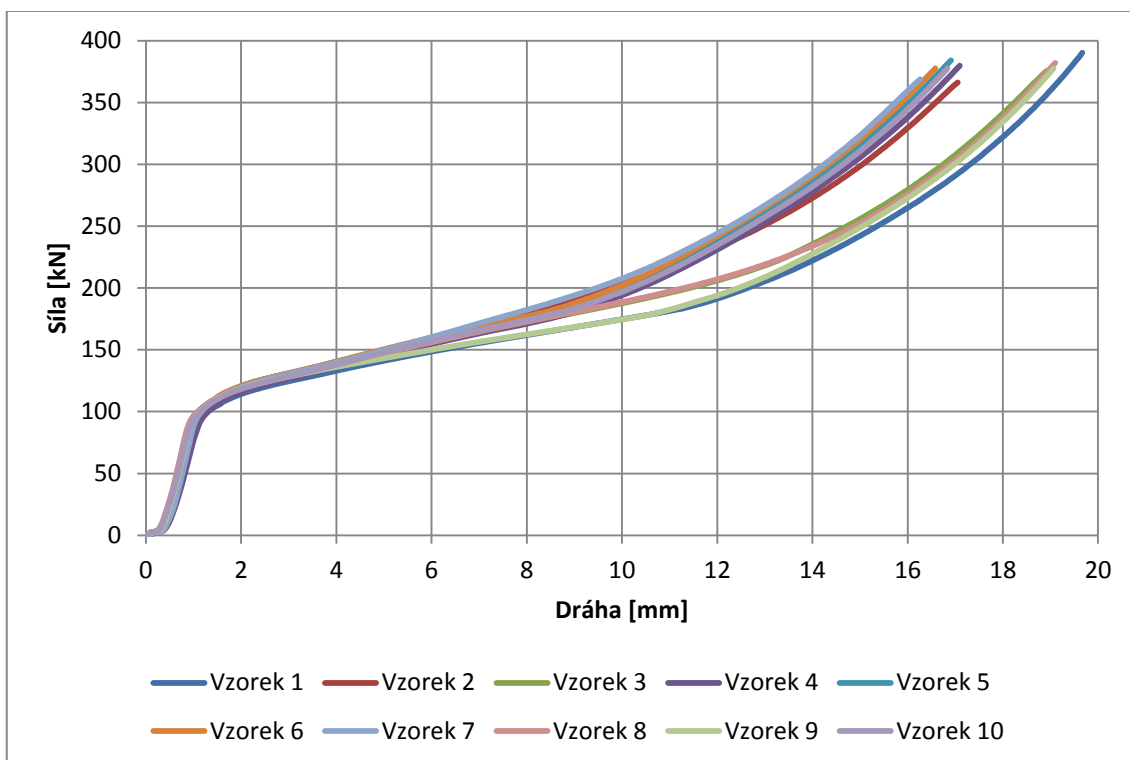
Obrázek 5.1 a obrázek 5.2 ilustruje závislost síly na dráze pro tváření materiálu 16MnCr5, obrázek 5.3 a obrázek 5.4 pro tváření materiálu S355J2G3. Je zde viditelný rozptyl naměřených hodnot. Neplatí zde, že na polotovar, který byl tvářen později, je potřeba větší síly.



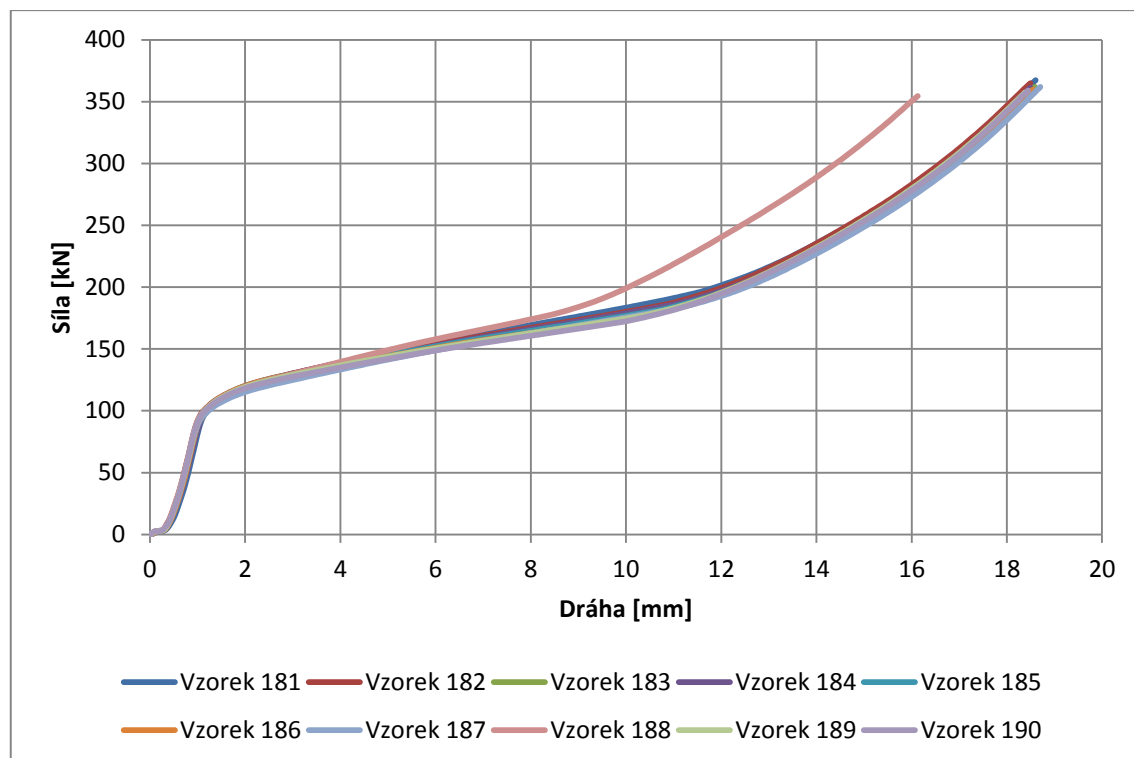
Obrázek 5.1: Lisovaný materiál 16MnCr5, vzorek 1 ÷ 10



Obrázek 5.2: Lisovaný materiál 16MnCr5, vzorek 221 ÷ 225



Obrázek 5.3: Lisovaný materiál S355J2G3, vzorek 1 ÷ 10

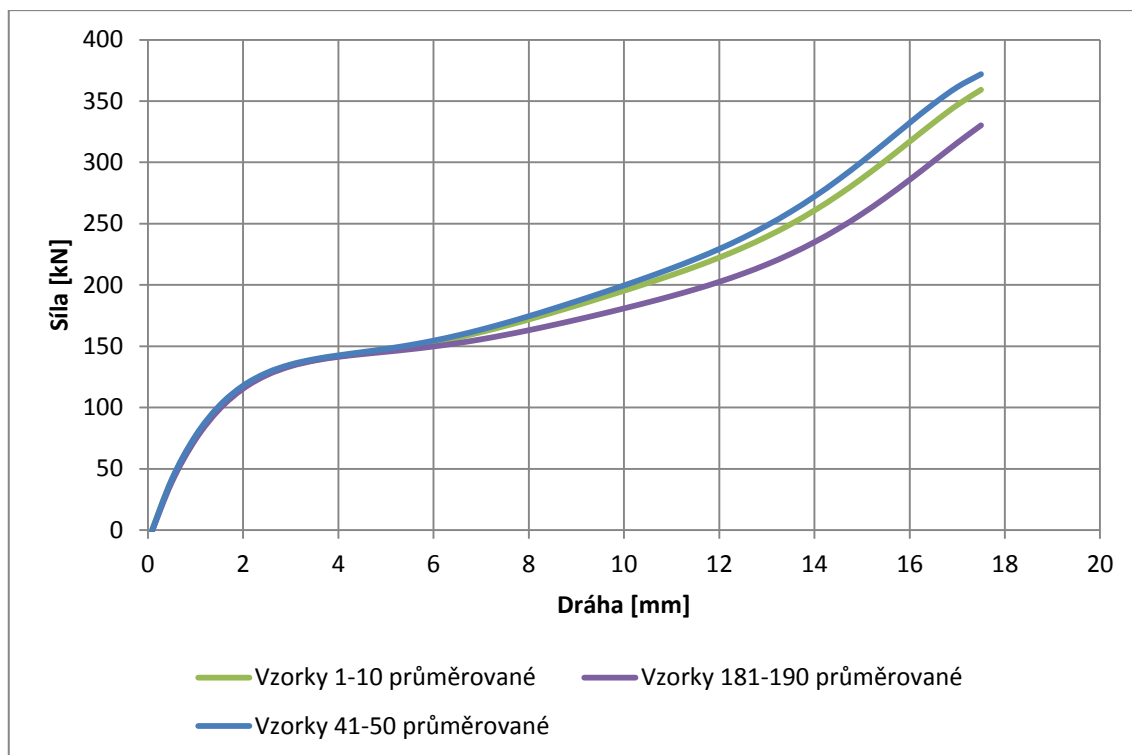


Obrázek 5.4: Lisovaný materiál S355J2G3, vzorek 181 ÷ 190

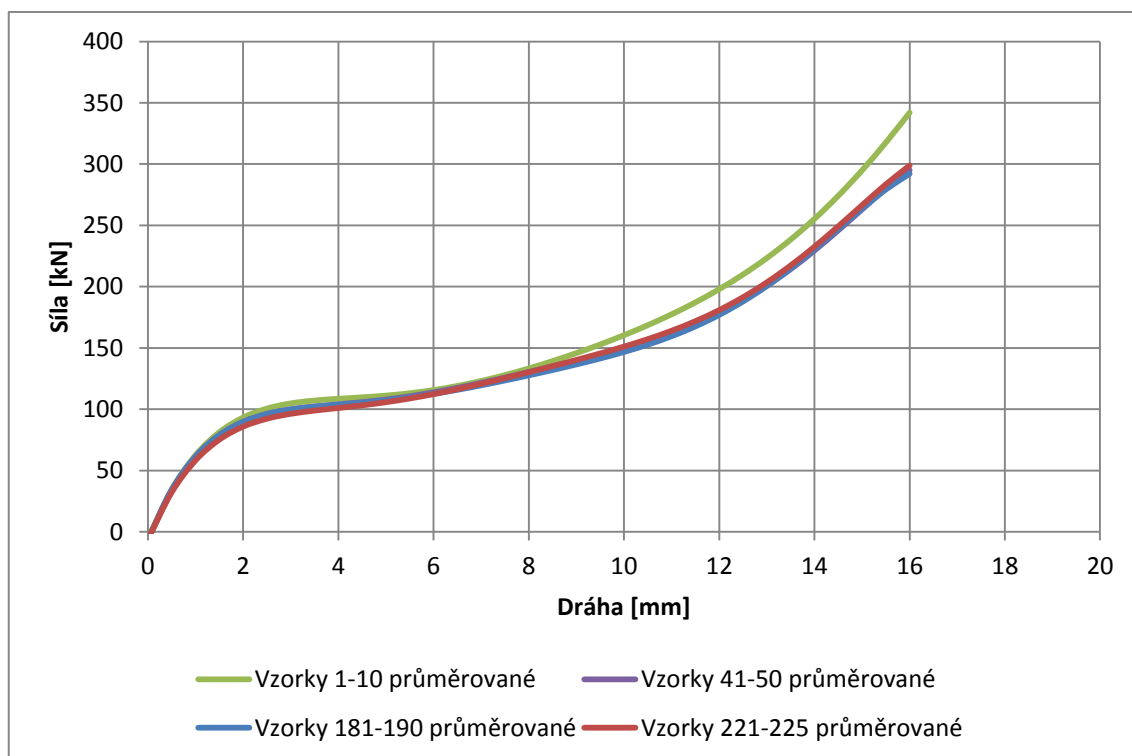
Hodnocení po odlisování několika desítek kusů není dostatečně vypovídající. Proto jsem se rozhodl porovnat mezi sebou křivky obsahující vzorky 1 ÷ 10, 41 ÷ 50, 181 ÷ 190 či 221 ÷ 225. Jelikož dle obrázku (obrázek 5.1) a dalších je patrné, že jednotlivé křivky jsou mezi sebou odlišné, rozhodl jsem se proložit každou křivkou polynomicou spojnicí 6tého řádu. Tím jsem mohl sestavit dané křivky zpětně, a zprůměrovat dosažené síly v přesně definovaných bodech.

Pomocí této metody jsem mohl stanovit průměrné hodnoty dosažených sil na vzdálenosti. Hodnoty získané ze stroje mi neumožnily toto zpracování, protože k odečtu hodnot nedocházelo při stejné vzdálenosti.

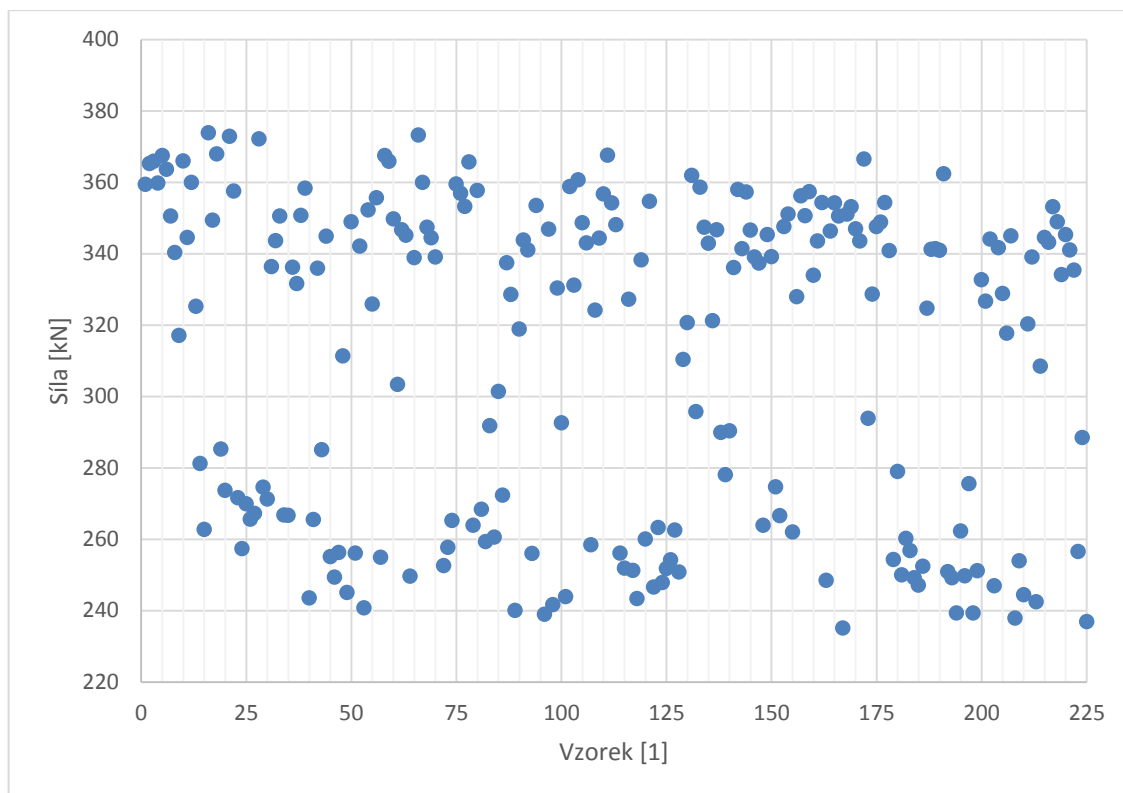
Takto získané průměrné hodnoty pro vzorek 1 ÷ 10, 41 ÷ 50, 181 ÷ 190 a pro materiál 16MnCr5 pro vzorky 221 ÷ 225, jsem sestavil grafy pro každý tvářený materiál, kde jsem si potvrdil, že s počtem vzorků nedochází ke zvyšování síly nutné na přetvoření polotovaru. Tento fakt je patrný z obrázků (obrázek 5.5 a obrázek 5.6) pro tvářené polotovary z materiálu S355J2G3 a 16MnCr5.



Obrázek 5.5: Průběh sil při tváření S355J2G3, data průměrované, polynomy 6tého řádu

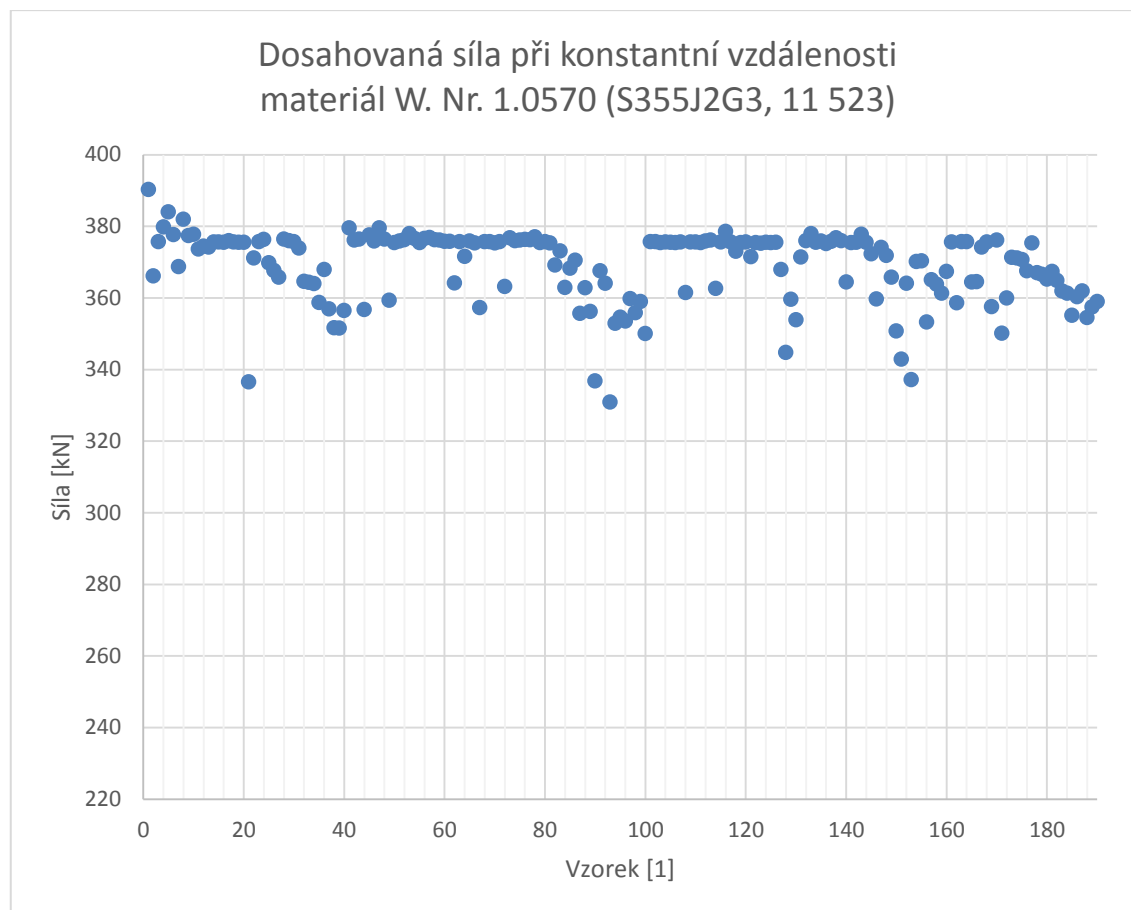


Obrázek 5.6: Průběh sil při tváření 16MnCr5, data průměrované, polynomy 6tého řádu



Graf 5.2: Dosahovaná síla při konstantní vzdálenosti, tvářený materiál 16MnCr5

Graf 5.2 vykazuje značné rozdíly z hlediska dosažené síly při stejné vzdálenosti ukončení lisování. Materiál má nestejnoměrné mechanické vlastnosti. Z grafu je patrné, že se rysují dvě dominantní pásma mechanických vlastností a to při vyvinuté síle  $320 \div 380$  kN a druhé pásmo  $230 \div 280$  kN. Některé vzorky během lisování praskaly. Jmenovitě např. vzorek č. 25. Pokud se zaměřím na vyvinutou sílu, která byla vyvinuta na vzorek č. 25 (graf 5.2), vidím, že se tento vzorek nacházel ve druhém pásmu ( $230 \div 280$  kN). Ve stejné oblasti se nacházejí například vzorky 21, 22, 23 a 24. U těchto vzorků nebylo zjištěno porušení. Je tedy pravděpodobné, že vzorky které se porušily, byly nehomogenní. Jelikož polotovary byly odpichovány z tyčí. Na soustruhu odpíchnuté vzorky nebyly rovnány v pořadí, a ani v pořadí odběru jednotlivých tyčí. Je tak možné, že jednotlivé tyče byly rozdílných vlastností, popřípadě zcela jiné tavby. Nemohu tak konstatovat, zda tento rozptyl hodnot je způsoben chybou měření či jiným zásahem.

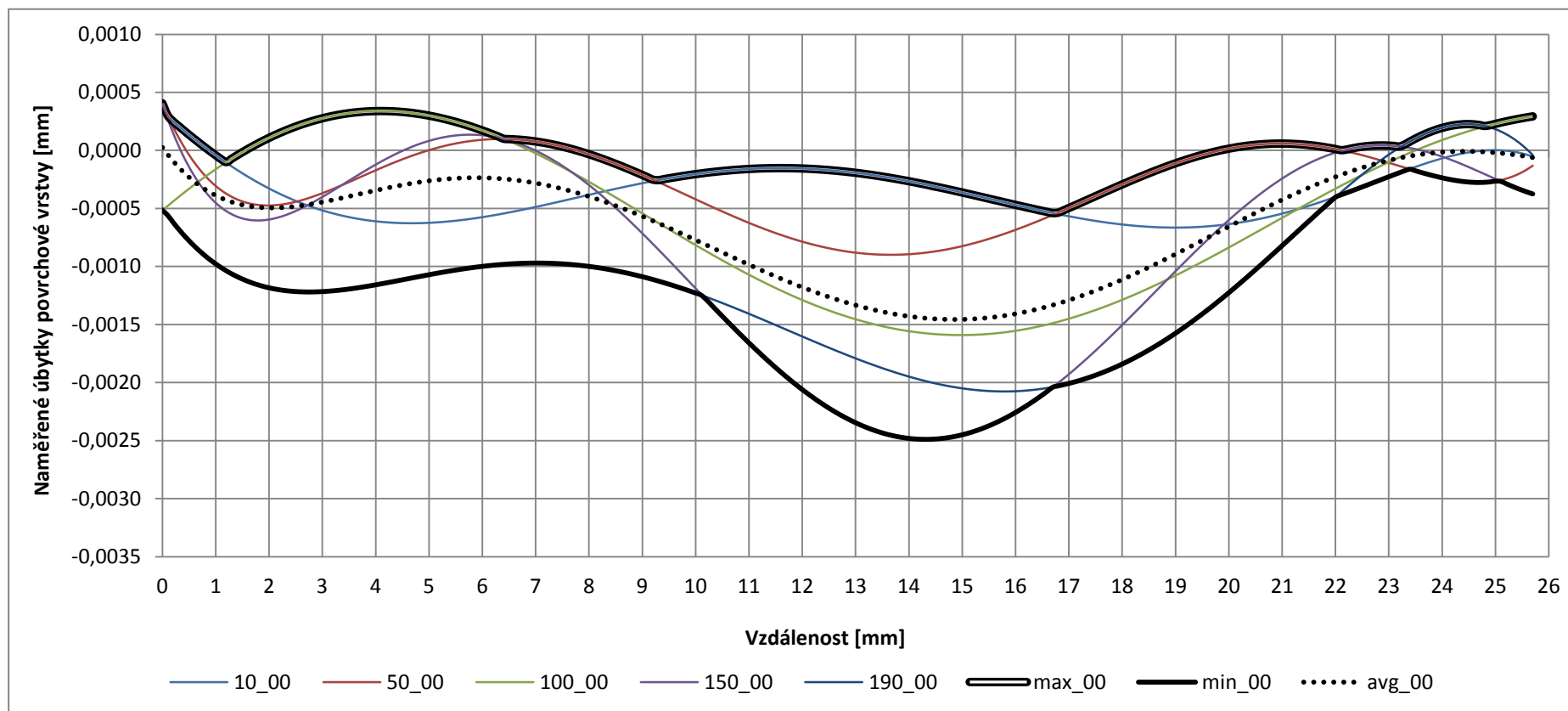


Graf 5.3: Dosahovaná síla při konstantní vzdálenosti, tvářený materiál S355J2G3

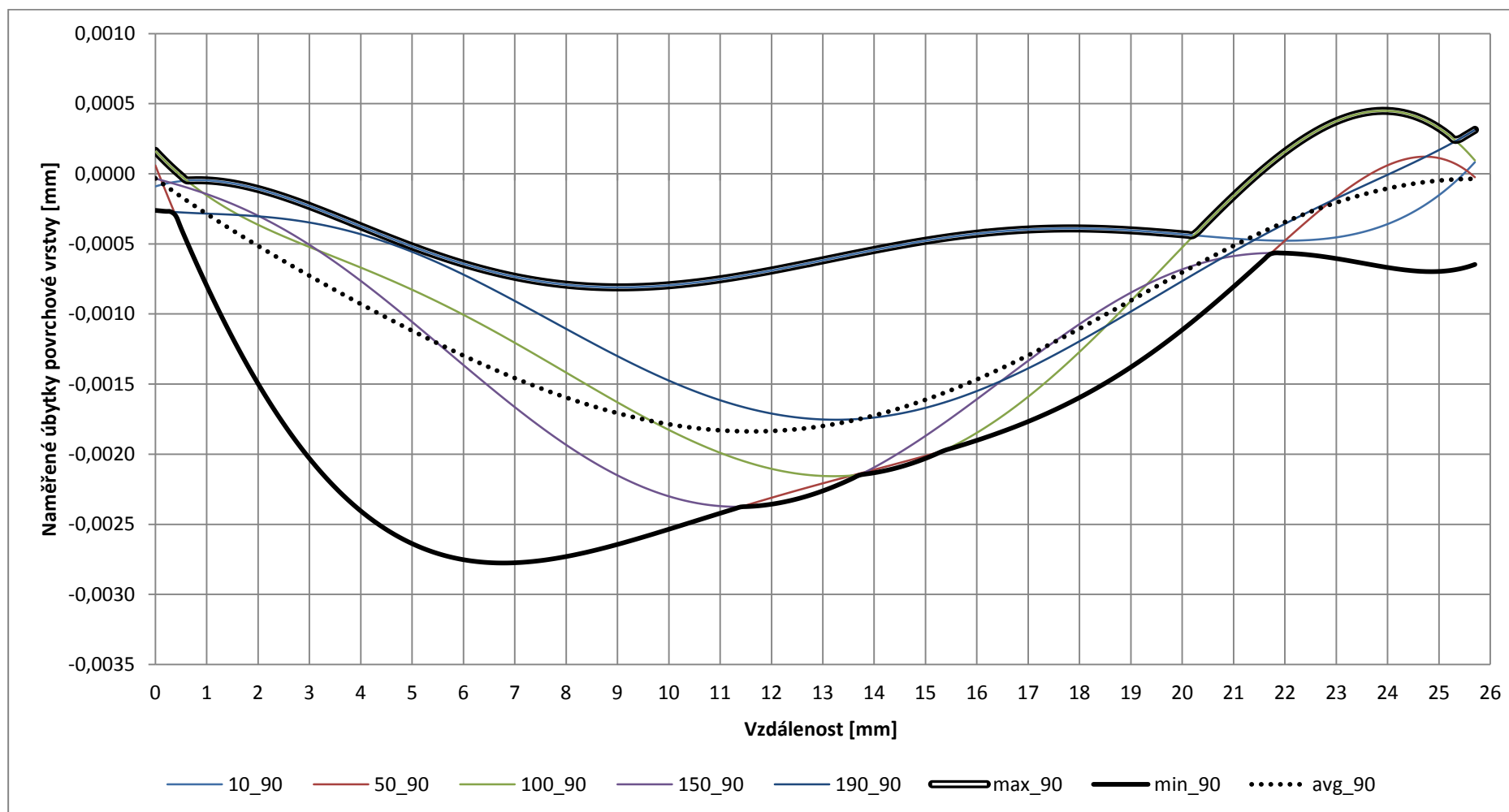
Graf 5.3 prezentuje materiál S355J2G3, který vykazuje velmi úzký rozptyl naměřených sil. Oproti předchozímu grafu (graf 5.2) je výrazně homogenní.

Vypovídající hodnota obou grafů je zkreslena ručním zastavováním stroje – finální vzdálenost se tedy lišila. Nelze tedy brát hodnoty získané jako směrodatné, ale pouze jako orientační. Při ohlédnutí na graf 5.3 ale mohu tvrdit, že zastavení bylo dostatečně přesné na možnost porovnání výsledků obou grafů (graf 5.2 a graf 5.3). Také mohu tvrdit, že graf 5.2 obsahuje data, která jsou při určité nejistotě správná, a rozptyl hodnot je pravdivý.

## 5.2 Naměřené úbytky povrchových vrstev při tváření materiálu S355J2G3



Graf 5.4: Graf vývoje topologie povrchu X210Cr12 (-1-00) během lisování materiálu S355J2G3 rovnoběžně se značením



Graf 5.5: Graf vývoje topologie povrchu X210Cr12 (-1-90) během lisování materiálu S355J2G3 kolmo na značení

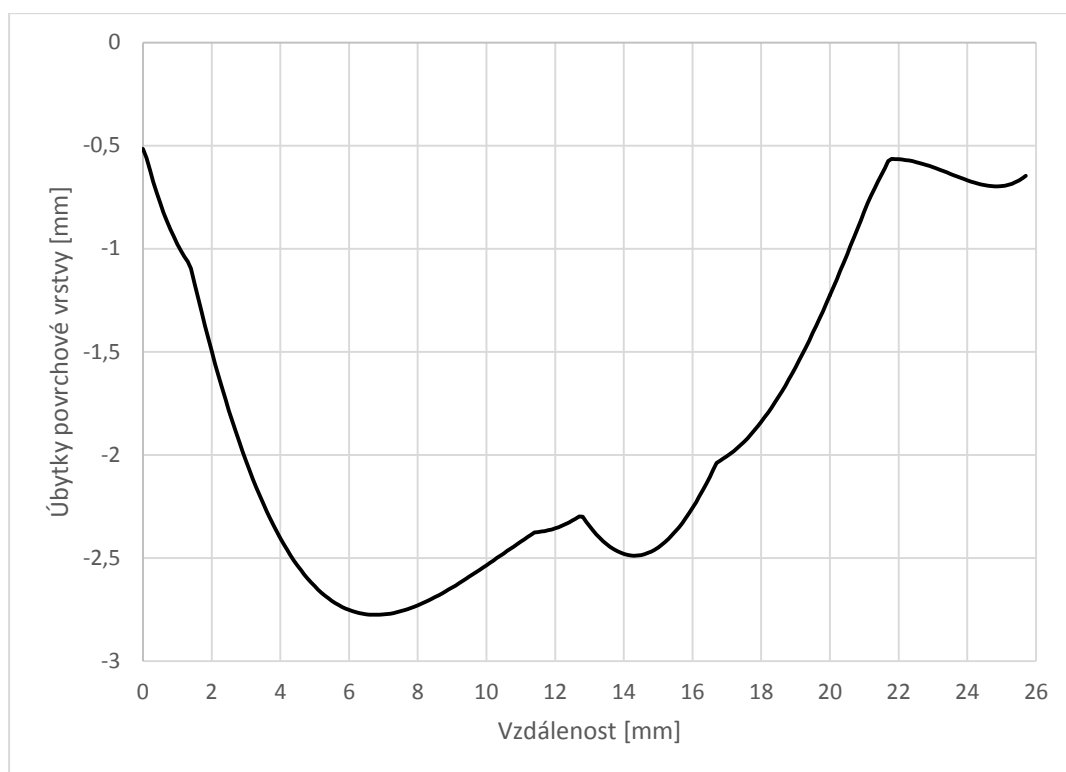


Z grafu (graf 5.4), pro nástroj z X210Cr12 a pro tvářený materiál S355J2G3, je patrný průběh vytváření úbytku v oblastech, kde je očekáván úběr-opotřebení materiálu (křivka min\_00). Tvoří se zde reliéf s výraznou prohlubní. Ta signalizuje výrazné opotřebení materiálu. Toto opotřebení je lokalizováno hlavně ve střední části grafu. Drobný posun do stran lze přičíst k nepřesnému ustavování polotovarů, případně nepřesnému vedení nástrojů vůči sobě.

Křivka zobrazující maximální výšku profilu (křivka max\_00) bychom mohli označit jako křivku zobrazující nárůstky (ulpěné částice na povrchu). To by ale nebylo správně. Je třeba si uvědomit, že tato křivka v sobě spojuje všechna maxima křivek povrchů. Obsahuje v sobě mimo jiné část původní neopotřebované geometrie a také samotné nárůstky. Je tedy možné křivku považovat za pravdivou v pásmu mezi krajem a střední částí. Nebo v jiném pojetí všude, kde je křivka nad původním profilem povrchu (zde křivka 10\_00 – po 10 ks).

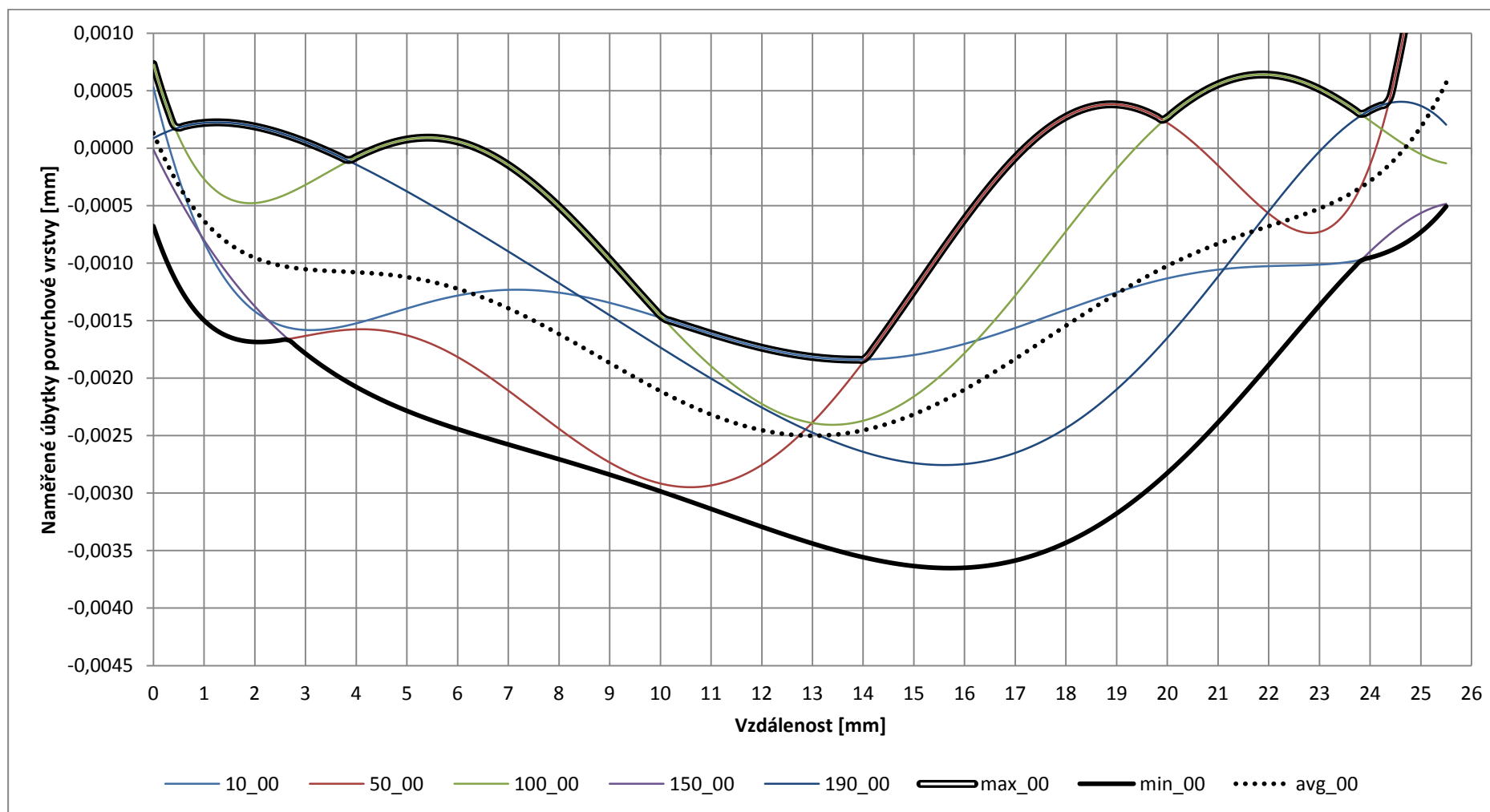
Graf 5.5 je pro nástroj ze stejného materiálu. Jediný rozdíl je, že měření probíhalo ve směru kolmém na značení nástroje. Křivka úběru-opotřebení (křivka min\_00) je oproti předchozímu grafu rozdílná. Je dosaženo většího úběru materiálu v levé střední části zkoumaného nástroje. Křivka obsahující nárůstky je na pravé krajní části viditelně zkreslena. Toto zkreslení lze jednoduše vysvětlit tím, že nástroje nejsou vůči sobě vedeny a lisovaný vzorek a nástroje vůči sobě se mohou pohybovat. Tento trend posunu je patrný i z obrázku (obrázek 5.7).

Jelikož se jedná o tváření kruhového vzorku, měl by v ideálním případě být profil shodný jak v rovině rovnoběžné na značení nástroje, tak v rovině kolmé na značení nástroje. Pokud bych sloučil oba grafy (graf 5.4 a graf 5.5) do jednoho, vypadala by výsledná topologie úbytků povrchu jako na grafu níže (graf 5.6). Musíme mít ale na paměti, že tento graf obsahuje vůči sobě posunuté jednotlivé tvořící křivky, a ty mohou deformovat výslednou křivku.

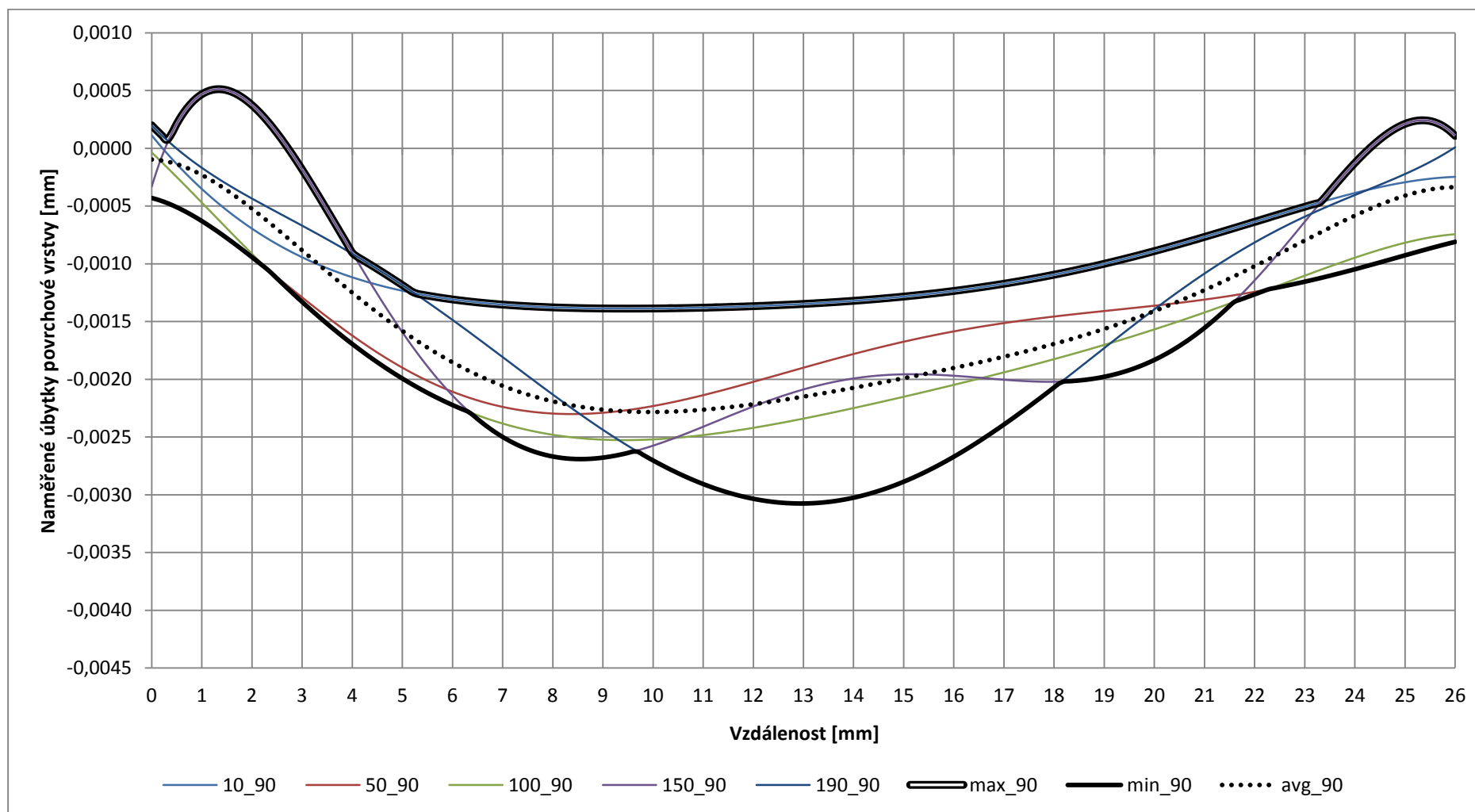


Graf 5.6: Sjednocený vývoj povrchu nástroje z X210Cr12 při tváření S355J2G3

Maximální úběr materiálu (opotřebení) X210Cr12 tvářející polotovaru z S355J2G3 dosahuje hodnoty  $-2,776 \mu\text{m}$ .



Graf 5.7: Graf vývoje topologie povrchu 60WCrV7 (-1-00) během lisování materiálu S355J2G3 rovnoběžně s značením



Graf 5.8: Graf vývoje topologie povrchu 60WCrV7 (-1-90) během lisování materiálu S355J2G3 kolmo na značení

Z grafu (graf 5.7), pro nástroj vyrobený z materiálu 60WCrV7 a pro tvářený materiál S355J1G3, je patrný průběh vytváření úbytku v oblastech, kde je očekáván úběr materiálu (křivka min\_00). V grafu je patrná značná rozkolísanost jednotlivých profilů, případně jejich posun. Je zde patrné pravděpodobně ve větší míře ulpívání částic na povrchu nástroje. Při bližším pohledu na jednotlivé křivky můžeme rozeznat, že jejich průběhy jsou velmi podobné, jsou mezi sebou posunuty. Nesmíme zapomenout na to, že jednotlivé křivky jsou měřeny vždy po odlisování určitého počtu polotovarů a tudíž nemohou spolu přímo korespondovat. Odchyly v krajních částech grafu jsou způsobeny korekcemi a zkreslením dat.

Graf 5.8 vykazuje větší míru úběru-opotřebení. Jedná se o totožný nástroj, pouze jsou data měřena ve směru kolmém na značení nástroje. Nejvíce opotřebovávaná část je i zde lokalizována ve střední části nástroje. Směrem k okrajům zkoumané oblasti se postupně zmenšuje. I zde jsou křivky jednotlivých měření nerovnoměrně rozložené, jako v předchozích grafech vývoje topologie povrchu během lisování S355J2G3. Překryv jednotlivých křivek lze vysvětlit nedostačeným vedením vůči sobě (obrázek 5.9 – patrný směr pohybu lze vyčíst z obrázku), případně nepřesným startovním bodem měření. Odchyly v krajních částech grafu jsou způsobeny korekcemi a zkreslením dat.

Jelikož se jedná o tváření kruhového vzorku, měl by být v ideálním případě profil shodný jak v rovině značení nástroje, tak v rovině kolmé na značení nástroje. Sloučením předchozích dvou grafů (graf 5.7 a graf 5.8) do jednoho, je výsledná topologie povrchu zobrazena na grafu níže (graf 5.9). Musíme mít ale na paměti, že tento graf obsahuje vůči sobě posunuté jednotlivé tvořící křivky, a ty mohou deformovat výslednou křivku.

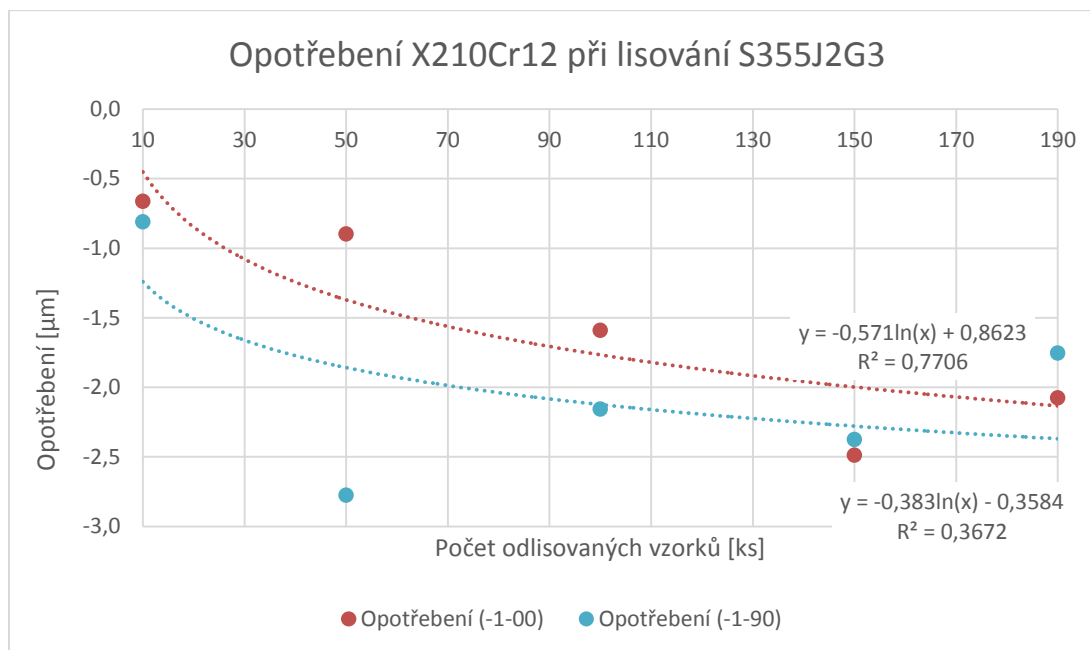


Graf 5.9: Sjednocený vývoj povrchu nástroje z 60WCrV7 při tváření S355J2G3

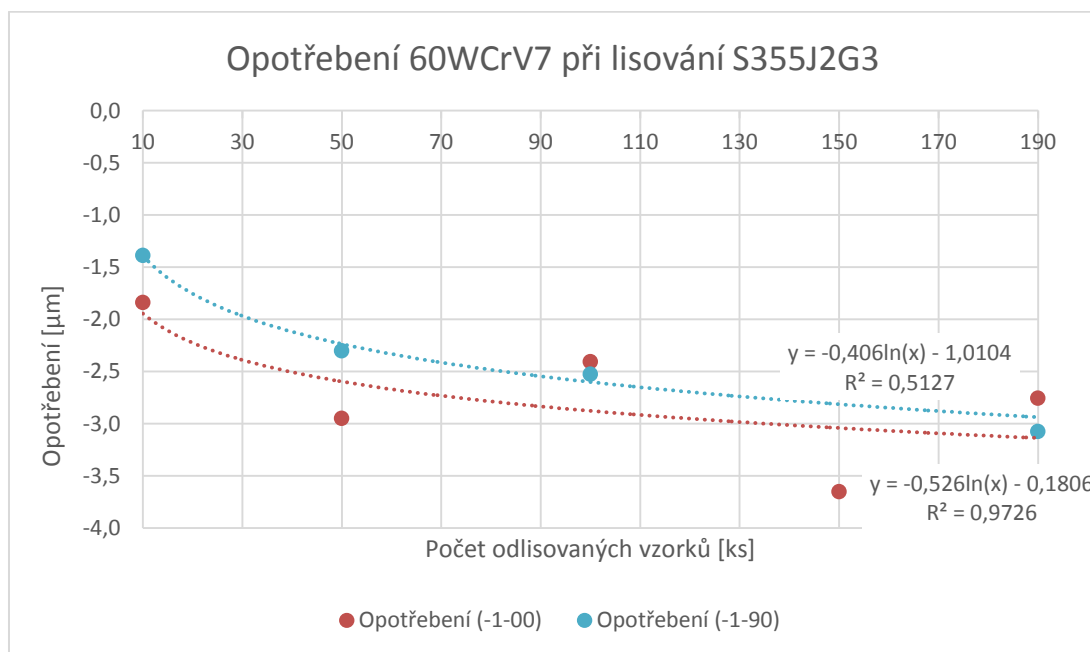
Maximální úběr materiálu (opotřebení) 60WCrV7 tvářející polotovaru z S355J2G3 dosahuje hodnoty  $-3,652 \mu\text{m}$ .

Hodnota opotřebení nástroje z materiálu X210Cr12 při lisování S355J2G3 je také zjištělná z grafu níže (graf 5.10). Pomocí rovnice můžeme určit hodnotu opotřebení pro jakýkoliv počet odlisovaných vzorků. Graf tvoří dvě křivky nazvané „Opotřebení (-1-00)“ a „Opotřebení (-1-90)“. První zmíněná křivka má hodnotu spolehlivosti 0,77, což je více než druhá křivka. Ta má hodnotu spolehlivosti pouze 0,367. Platí, že čím více se blíží hodnota spolehlivosti k 1, tím více je výsledek spolehlivý. Nebo můžeme říci, že čím vyšší číslo spolehlivosti, tím více se křivka blíží k jednotlivým bodům. Pomocí rovnice pro první křivku bychom mohli odhadovat velikost úběru po X-tém odlisovaném vzorku s určitou spolehlivostí.

Hodnota opotřebení nástroje z materiálu 60WCrV7 při lisování S355J2G3 je také zjištělná z obdobného grafu (graf 5.11). I zde jsou dvě křivky s rozdílnou hodnotou spolehlivosti. Zde bych se klonil k rovnici s hodnotou spolehlivosti 0,973.

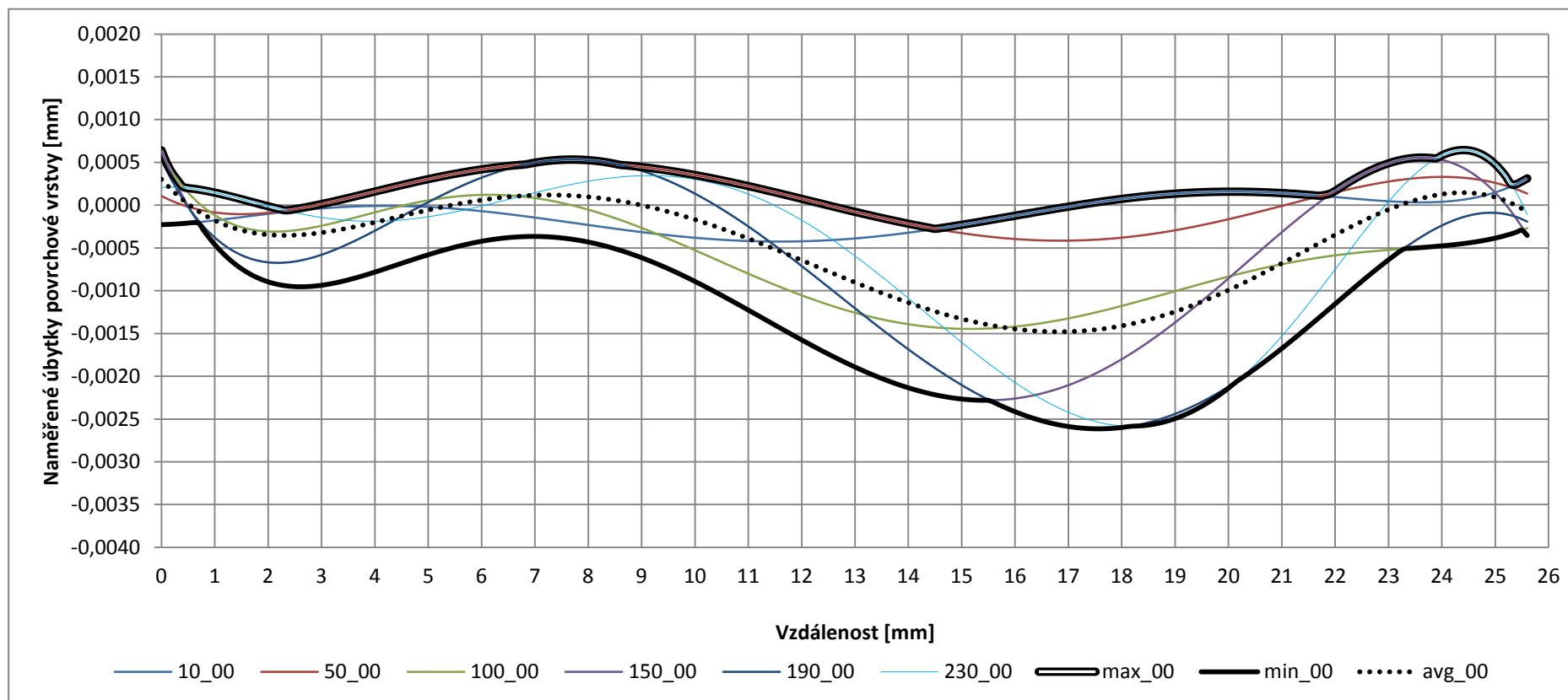


Graf 5.10: Graf maximálních naměřených úbytků povrchových vrstev pro materiál X210Cr12 lisován materiál S355J2G3



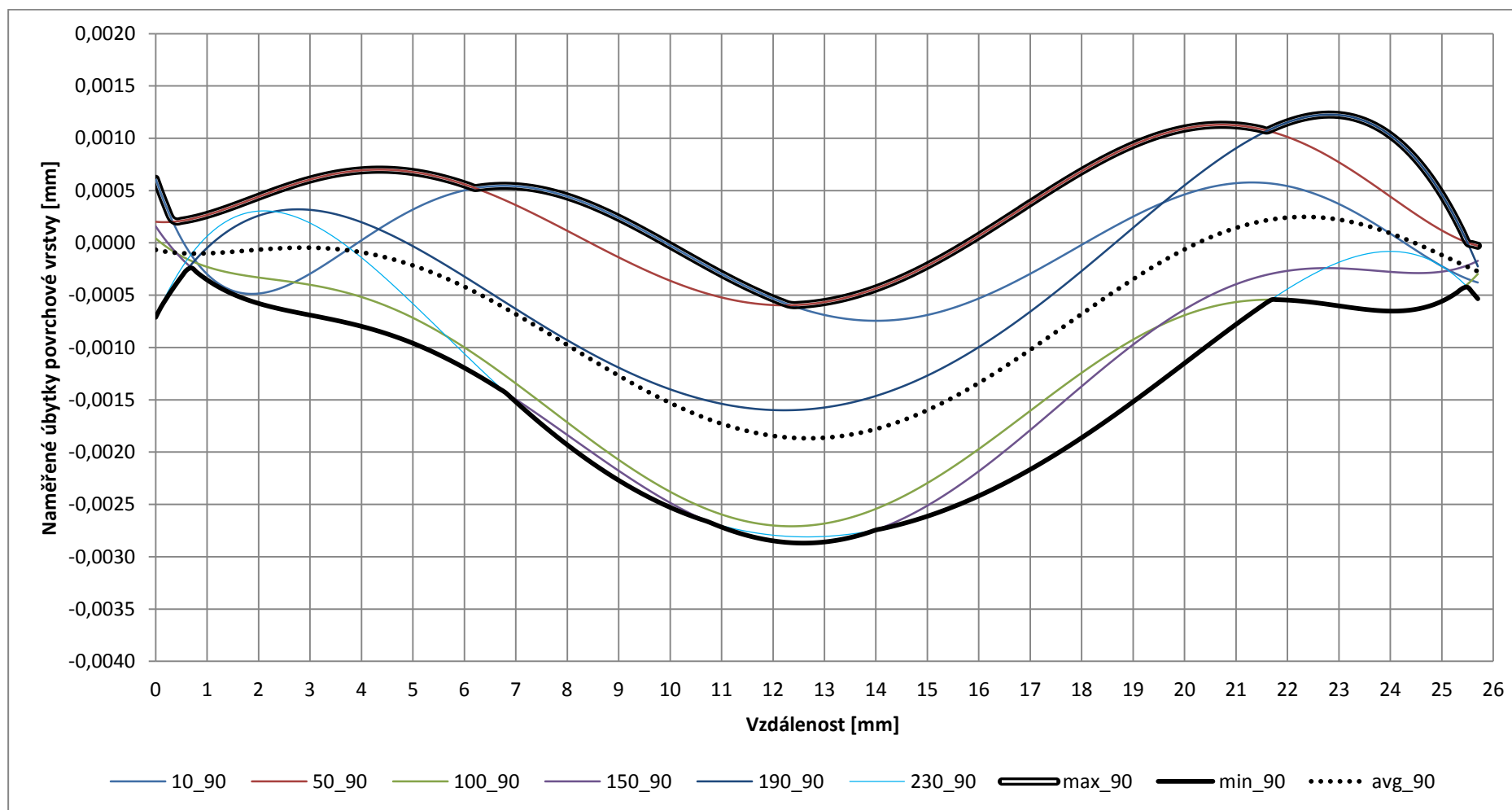
Graf 5.11: Graf maximálních naměřených úbytků povrchových vrstev pro materiál 60WCrV7, lisován materiál S355J2G3

### 5.3 Naměřené úbytky povrchových vrstev při tváření materiálu 16MnCr5



Graf 5.12: Graf vývoje topologie povrchu X210Cr12 (-2-00) během lisování materiálu 16MnCr5 rovnoběžně s značením





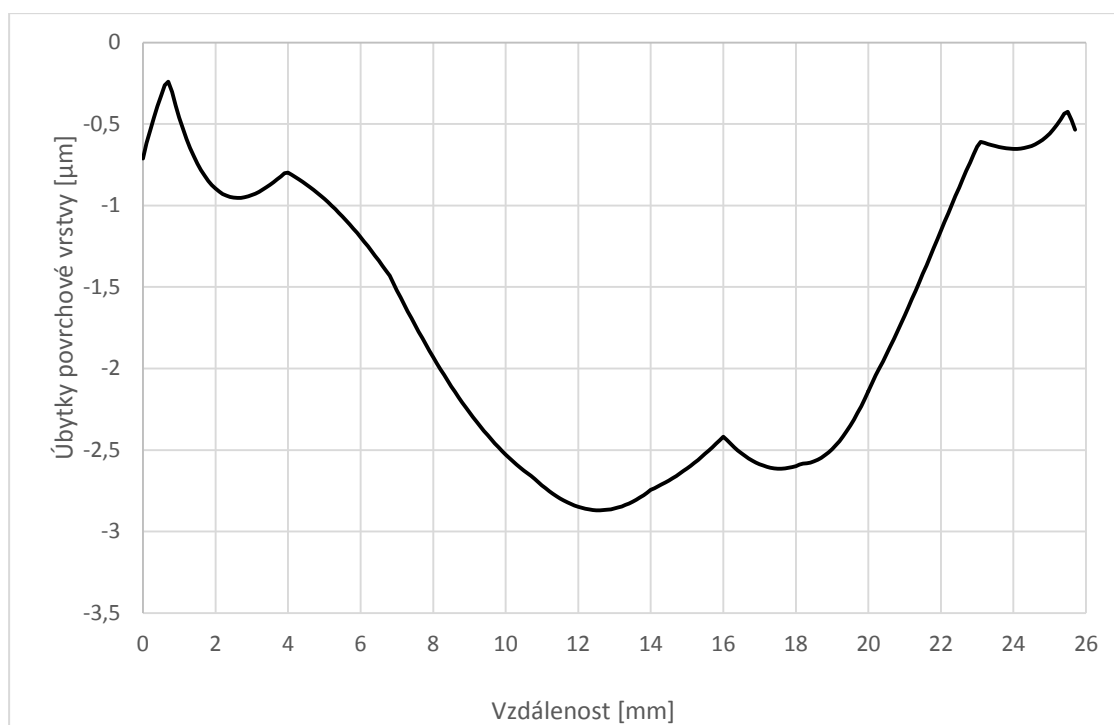
Graf 5.13: Graf vývoje topologie povrchu X210Cr12 (-2-90) během lisování materiálu 16MnCr5 kolmo na značení

Graf 5.12 reprezentuje nástroj z materiálu X210Cr12, který tváří špalíčky z materiálu 16MnCr5. V grafu je viditelná podobnost s předcházejícím grafem (graf 5.4) – který tváří materiál S355J2G3. Zde je posunut maximální úběr k pravému kraji. To může být zapříčiněno nedostatečným vedením nástrojů vůči sobě, nebo nehomogenitou lisovaných vzorků. Nevylučuji také nepřesné ustavení polotovaru. V obou grafech je i viditelný drobný úběr v levé části grafu. Tvoří se zde menší prohlubeň, lokace a velikost těchto prohlubní je podobná u obou grafů (graf 5.4 a graf 5.12) a to i přes to, že se tváří rozdílné materiály.

Oproti tomu graf 5.13 zobrazuje úbytky materiálu přesně dle očekávání – tedy ve střední části. Tento graf vypadá nejrovnoměrnější oproti předchozím grafům (graf 5.4, graf 5.5, graf 5.7, graf 5.8, graf 5.12). Odchylky v krajních částech grafu jsou způsobeny korekcemi a zkreslením dat.

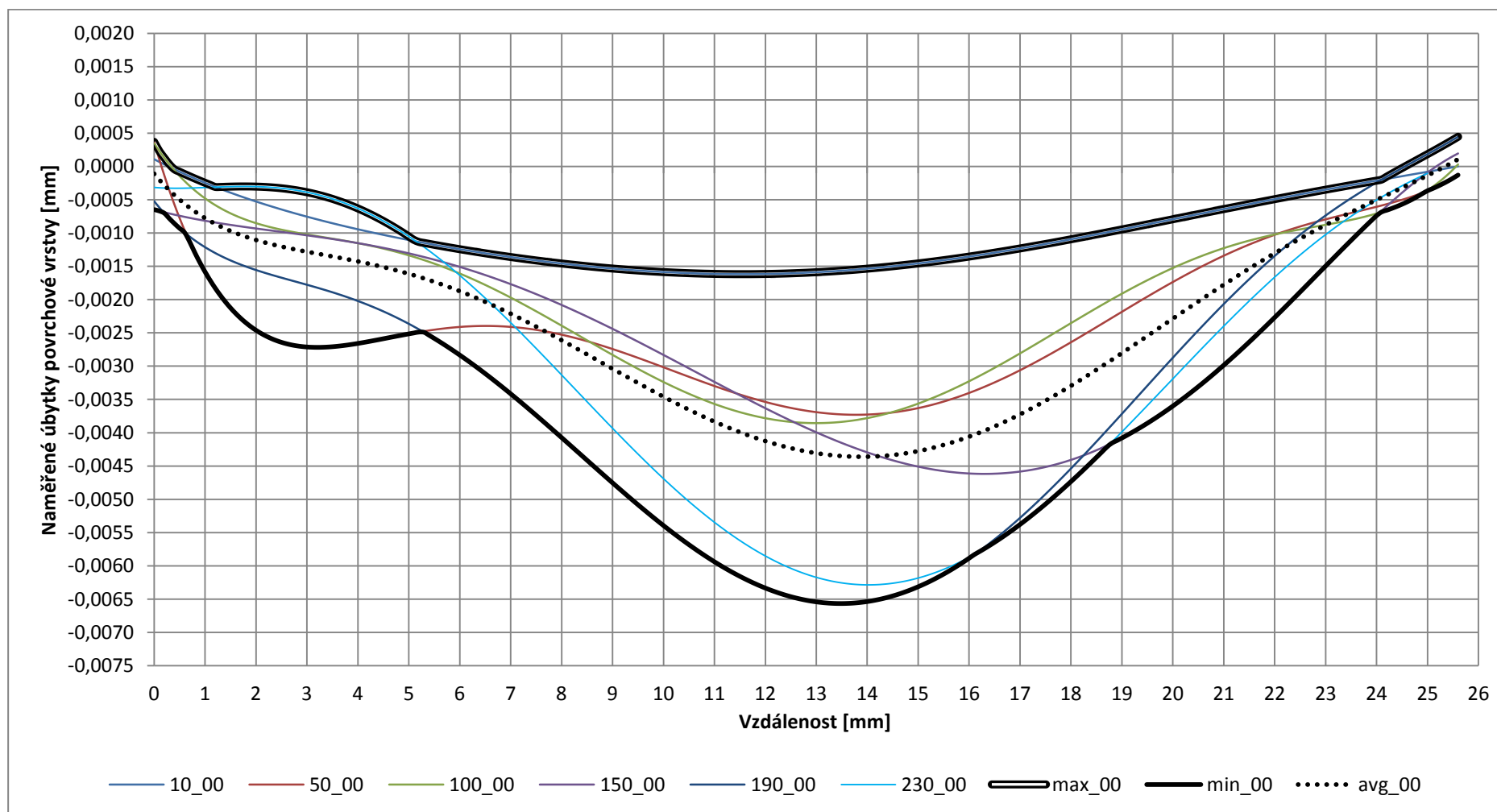
Pokud se porovnají grafy mezi sebou, můžeme usoudit, že zde se pohybovala jedna část nástroje vůči druhé. Je tu znatelný posun střední části k pravé straně grafu (graf 5.12). Oproti tomu graf 5.13 vypadá takřka ideálně.

Jelikož se jedná o tváření kruhového vzorku, měl by být v ideálním případě profil shodný jak v rovině rovnoběžné na značení nástroje, tak v rovině kolmé na značení nástroje. Pokud bych eliminoval nárůstky, které mohly během procesu ulpět na povrchu nástroje, a sloučil tyto grafy do jednoho, vypadala by výsledná topologie povrchu jako na grafu “Graf 5.14: Sjedený vývoj povrchu nástroje z X210Cr12 při tváření 16MnCr5“. Do tohoto grafu se promítly křivky min\_00 (graf 5.12) a min\_90 (graf 5.13). Musíme mít ale na paměti, že tento graf obsahuje vůči sobě posunuté jednotlivé tvořící křivky, a ty mohou deformovat výslednou křivku.

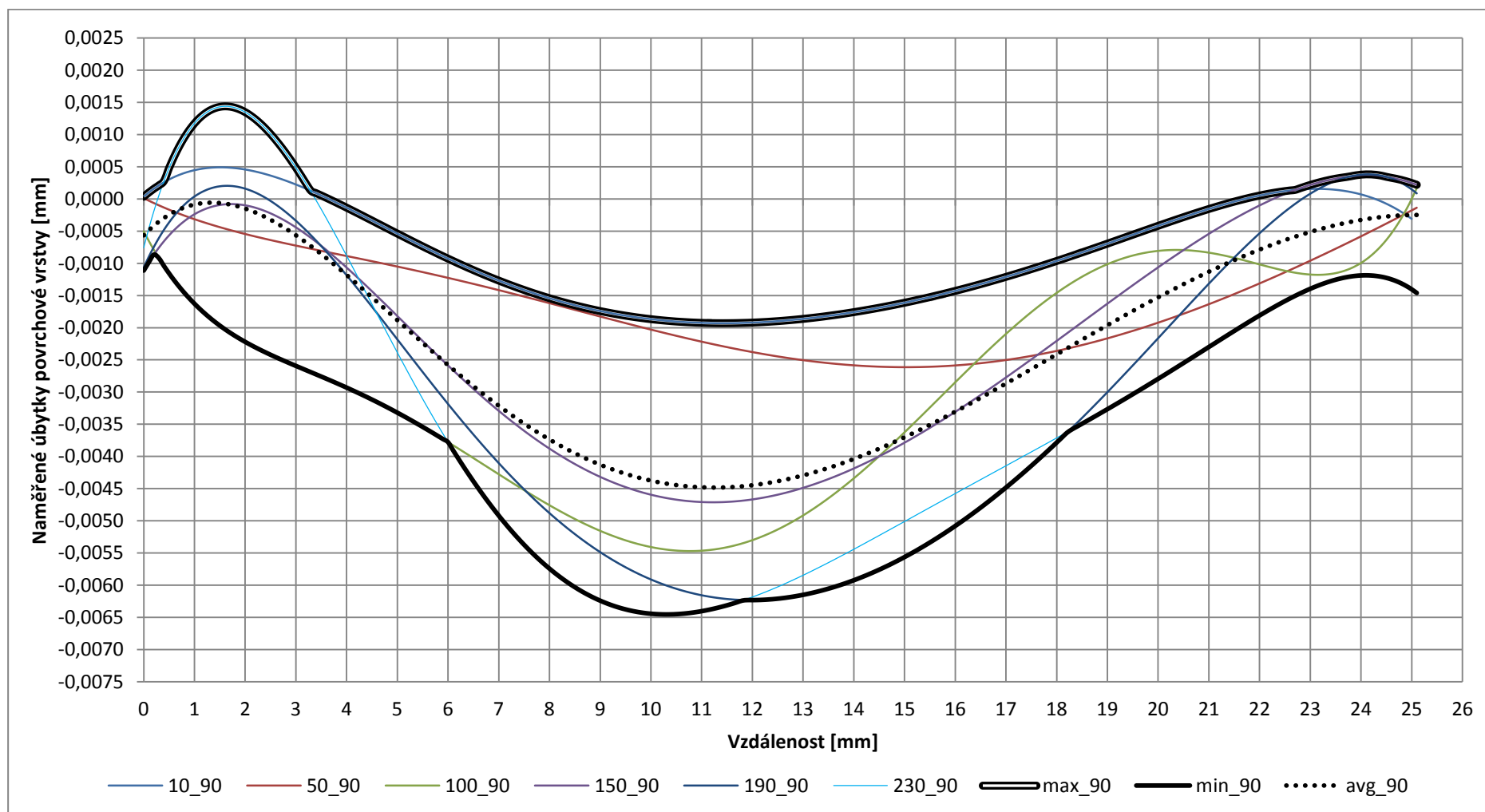


Graf 5.14: Sjednocený vývoj povrchu nástroje z X210Cr12 při tváření 16MnCr5

Maximální úběr materiálu (opotřebení) X210Cr12 tvářející polotovaru z 16MnCr5 dosahuje hodnoty  $-2,87 \mu\text{m}$ .



Graf 5.15: Graf vývoje topologie povrchu 60WCrV7 (-2-00) během lisování materiálu 16MnCr5 rovnoběžně s značením



Graf 5.16: Graf vývoje topologie povrchu 60WCrV7 (-2-90) během lisování materiálu 16MnCr5 kolmo na značení

Poslední dva grafy z celé série zkoumaných nástrojů jsou svým průběhem podobné jako předchozí dva grafy (graf 5.12 a graf 5.13). Graf 5.15 ukazuje nástroj z materiálu 60WCrV7 tvářicí vzorek z materiálu 16MnCr5. Střední část grafu zobrazuje část s maximálním opotřebením nástroje. Nárůstky se zde tvoří minimálně – na tvorbu a jejich hodnocení jsem se nezaměřoval. Křivka úběrů – opotřebení (min\_00) není příliš symetrická. V levé části grafu je pozorovatelná druhá prohlubeň, kde dochází k úběru nástroje. Odchytky v krajních částech grafu jsou způsobeny korekcemi a zkreslením dat, případně nepřesností vedení nástrojů vůči sobě. Není také vyloučeno nepřesné ustavení polotovaru.

Graf 5.16 zobrazuje úbytky materiálu dle očekávání a do jisté míry koresponduje s předchozím grafem. Ve střední části dohází k úběru materiálu – opotřebení nástroje. V levé části se neformuje prohlubeň a je zde znatelný úbytek materiálu.

Pokud se porovnají grafy mezi sebou, můžeme usoudit, že zde se pohybovaly jednotlivé části nástroje vůči sobě. Posun není tak znatelný, ale pokud se zaměříme na jednotlivé změřené křivky, tak můžeme tento posun zaznamenat.

Jelikož se jedná o tváření kruhového vzorku, měl by v ideálním případě být profil shodný jak v rovině rovnoběžné na značení nástroje, tak v rovině kolmé na značení nástroje. Sloučením obou grafů (graf 5.15 a graf 5.16) do jednoho grafu (graf 5.17), vypadala by výsledná topologie povrchu jako na grafu “Graf 5.1: Nezpracovaná změřená data nástroje X210Cr12 lisující S355J2G3, naměřeno po odlisování prvních 10 ks” Musíme mít ale na paměti, že tento graf obsahuje vůči sobě posunuté jednotlivé tvořící křivky, a ty mohou deformovat výslednou křivku. Pro představu o maximu úběru – opotřebení je dostatečně vypovídající.

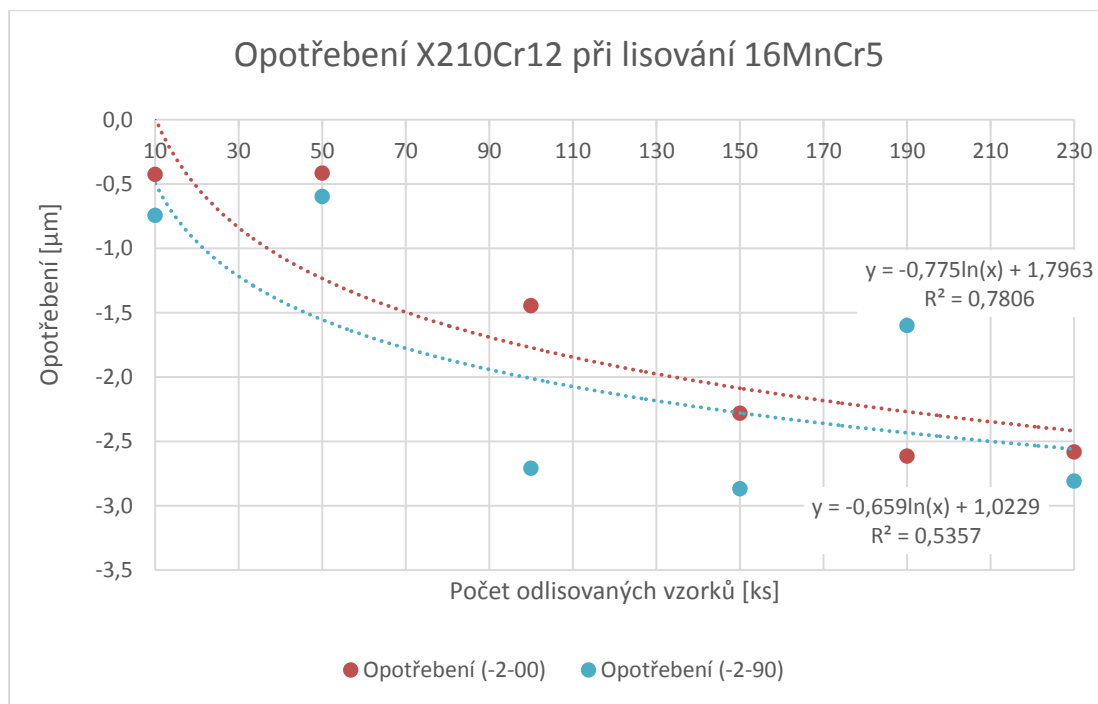


Graf 5.17: Sjednocený vývoj povrchu nástroje z 60WCrV7 při tváření 16MnCr5

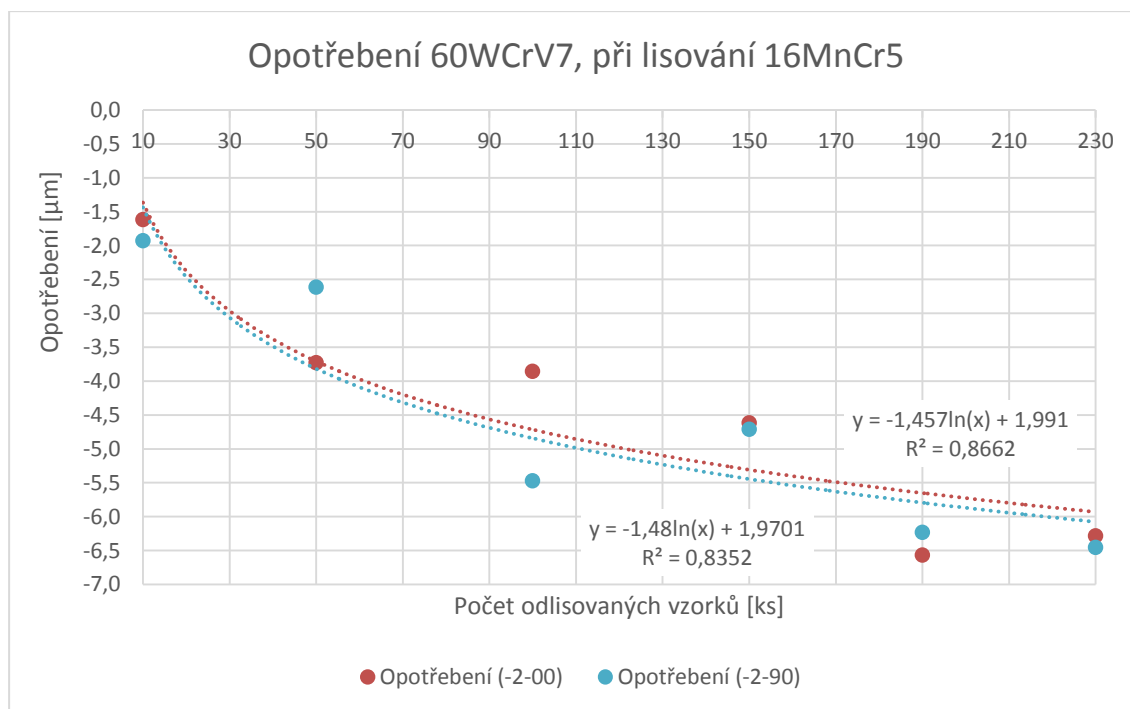
Maximální úběr materiálu (opotřebení) X210Cr12 tvářející polotovar z 16MnCr5 dosahuje hodnoty  $-6,566 \mu\text{m}$ .

Hodnota opotřebení nástroje z materiálu X210Cr12 při lisování 16MnCr5 je zjistitelná z grafu níže (graf 5.18). Graf tvoří dvě křivky nazvané „Opotřebení (-2-00)“ a „Opotřebení (-2-90)“. První zmíněná křivka má hodnotu spolehlivosti 0,781, druhá křivka má hodnotu spolehlivosti pouze 0,536. Rovnice první křivky je tedy spolehlivější pro odhad vývoje opotřebení.

Hodnota opotřebení nástroje z materiálu 60WCrV7 při lisování 16MnCr5 je zjistitelná z obdobného grafu (graf 5.19). I zde jsou dvě křivky („Opotřebení (-2-00)“ a „Opotřebení (-2-90)“) s rozdílnou hodnotou spolehlivosti. Zde bych se klonil k rovnici první křivky, protože má hodnotou spolehlivosti 0,866. Kdežto druhá křivka má hodnotu spolehlivosti 0,835.



Graf 5.18: Graf maximálních naměřených úbytků povrchových vrstev pro materiál nástroje X210Cr12, lisován polotovar 16MnCr5

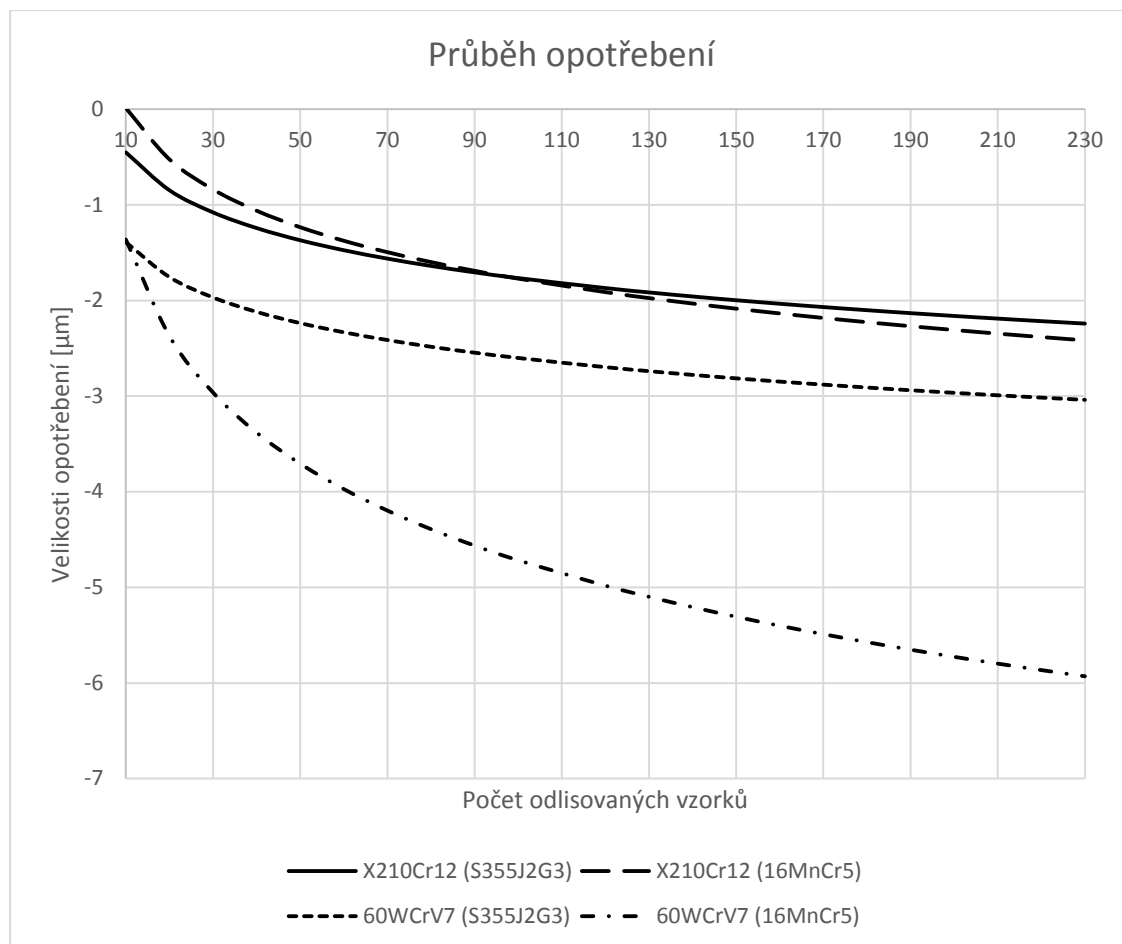


Graf 5.19: Graf maximálních naměřených úbytků povrchových vrstev pro materiál 60WCrV7, lisován polotovar 16MnCr5



## 5.4 Vývoj opotřebení dle naměřených úbytků – shrnutí

Z kapitoly 5.2 a 5.3 jsem použil rovnice s nejvyššími hodnotami spolehlivosti a vykreslil graf 5.20 znázorňující teoretický průběh opotřebení jednotlivých materiálů nástrojů.



Graf 5.20: Teoretický průběh opotřebení

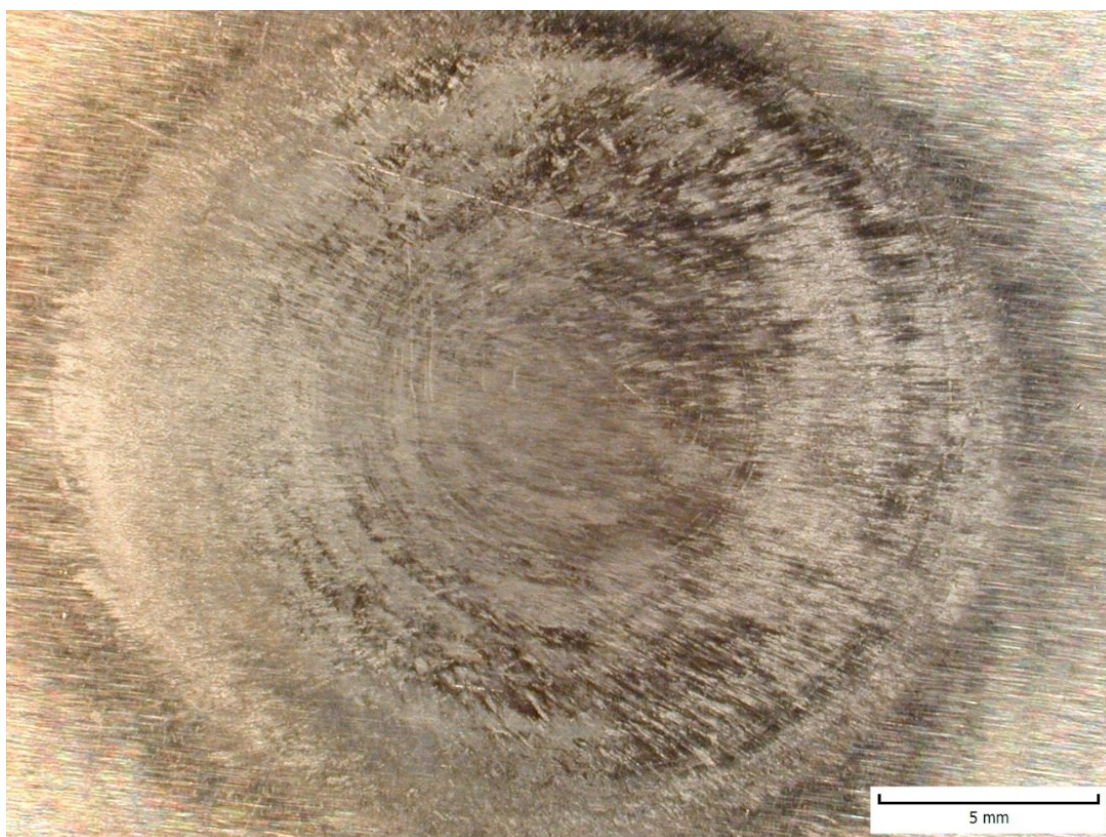
## 5.5 Snímky povrchu nástroje X210Cr12 ze stereo mikroskopu

Snímky povrchu nástrojů byly nasnímány na stereo mikroskopu firmy Olympus, typ SZX12. Snímky byly snímány třetí stranou, není tedy možné zpětně zjistit orientaci snímané desky.

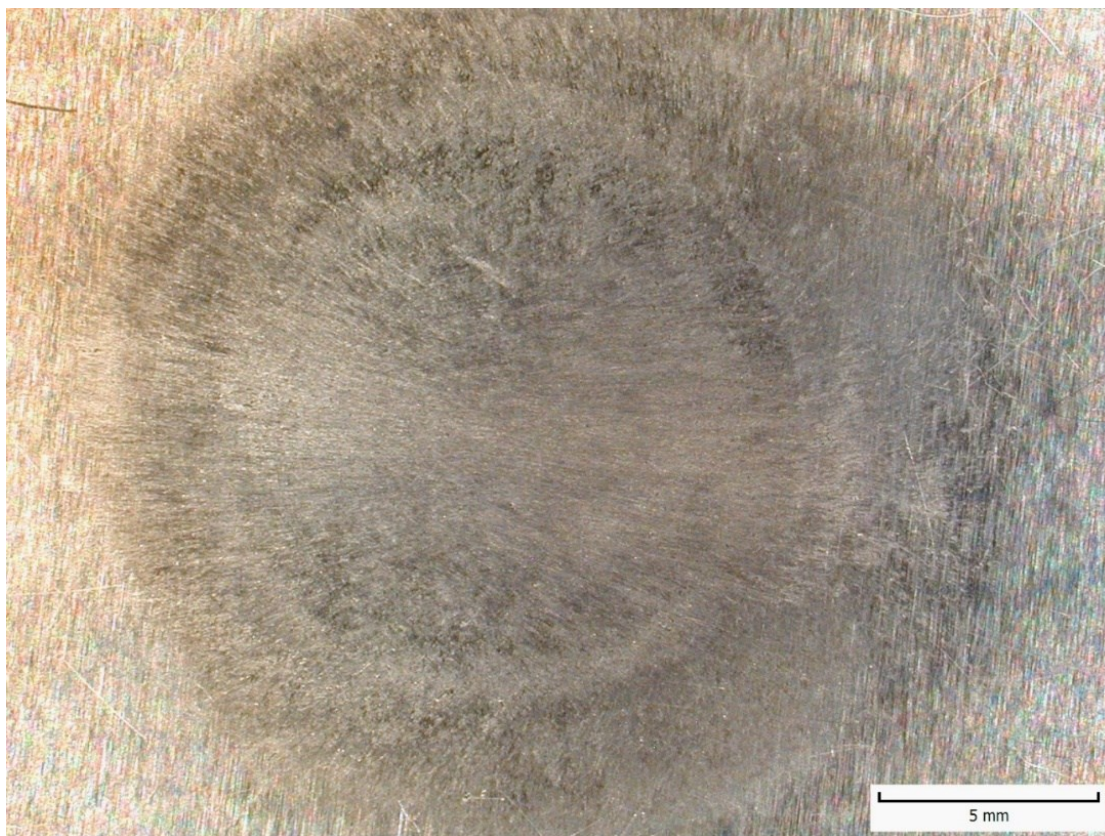
Rohové části snímků (obrázek 5.7, obrázek 5.8) obsahují původní povrch, který nebyl opotřebován. Na obrázek 5.7 lze vidět směry pohybu přetvářeného materiálu S355J2G3. Stopy na nástroji jsou dobře rozpoznatelné i pouhým okem. Tendence pohybu materiálu do jedné strany lze přičíst i nedostatečnému vedení nástrojů ve stroji.

Méně viditelné stopy po pohybu materiálu jsou na obrázek 5.8. Zde dochází ke kontaktu nástroje X210Cr12 a polotovaru z materiálu 16MnCr5.

Tyto snímky umožní vytvořit si představu o celkové ploše nástroje, kde dochází k tváření polotovaru.



Obrázek 5.7: Snímek opotřebované plochy nástroje X210Cr12, lisován materiál S355J2G3



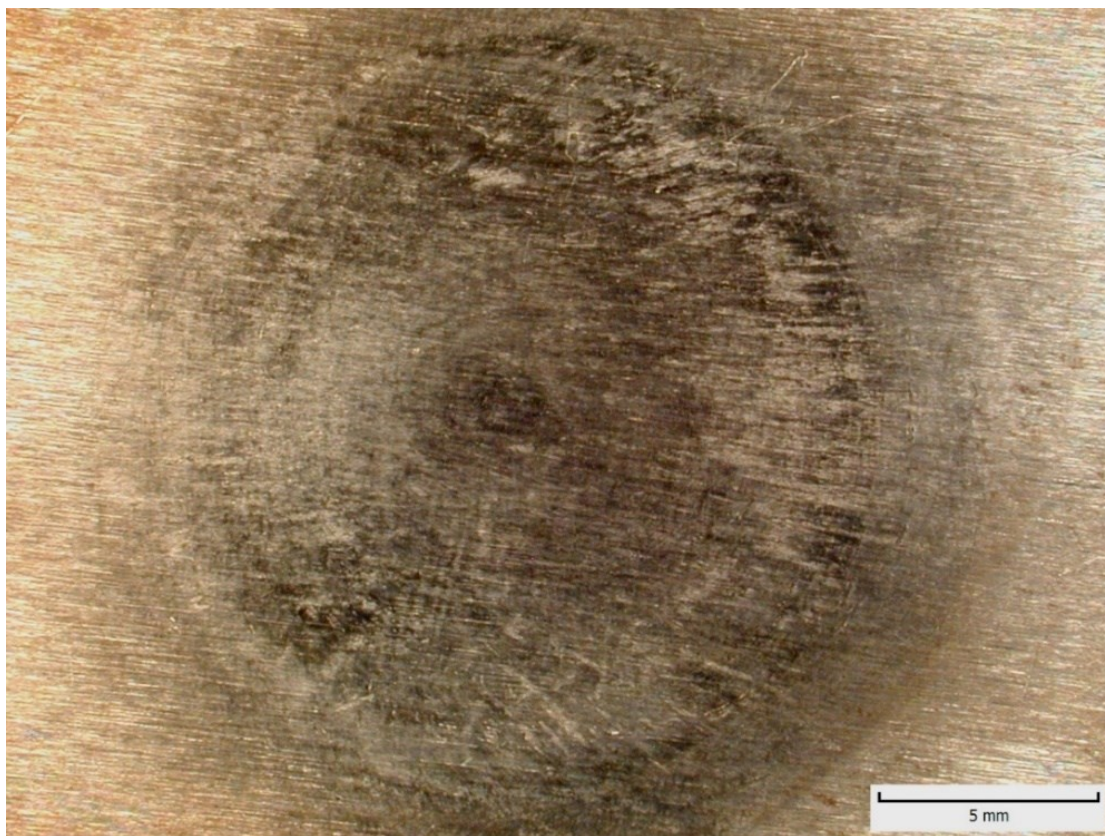
Obrázek 5.8: Snímek opotřebované plochy nástroje X210Cr12, kde je lisován materiál 16MnCr5

## 5.6 Snímky povrchu nástroje 60WCrV7 ze stereo mikroskopu

Obrázek 5.9 prezentuje snímek nástroje z materiálu 60WCrV7, který je v kontaktu s polotovarem z materiálu S355J2G3. Stopy po polotovaru jsou zde dobře rozeznatelné. Na snímku lze vyčíst i hlavní směry pohybu tvářeného materiálu. Nejvíce opotřebovaná místa jsou zde rozpoznatelná nejen pomocí měření ale i vizuálně. Tato místa jsou indikována vrypy, které porušují stopy polotovaru a odkrývají čistý povrch nástroje.

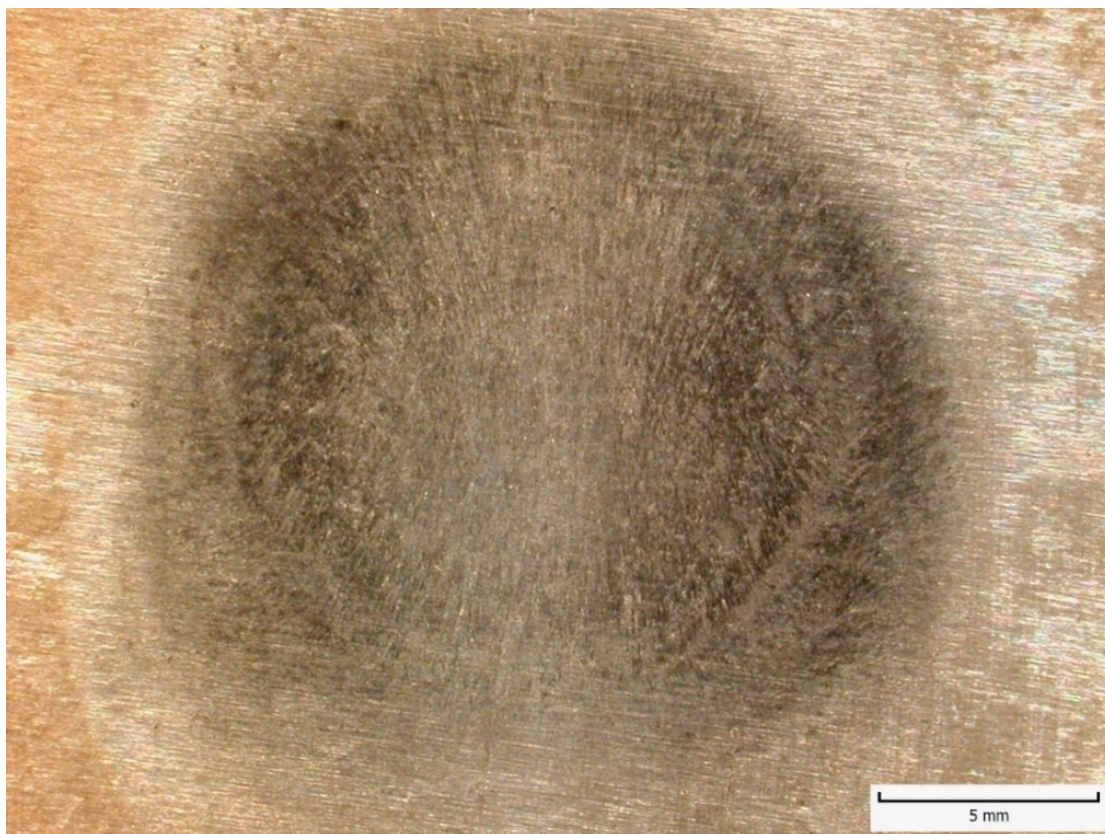
Tyto snímky umožní vytvořit si představu o celkové ploše nástroje, kde dochází k tváření polotovaru.





Obrázek 5.9: Snímek opotřebované plochy nástroje 60WCrV7, lisován materiál S355J2G3

Obrázek 5.10 koresponduje s předchozím materiálem nástroje (60WCrV7) i zde jsou stopy viditelně menší než na obrázku výše (obrázek 5.9). Předpokládám, že tento nástroj (lisuje polotovary z materiálu 16MnCr5) bude méně opotřeбен než jeho ekvivalent (obrázek 5.9), který lisuje polotovary z materiálu S355J2G3.



Obrázek 5.10: Snímek opotřebované plochy nástroje 60WCrV7, lisován 16MnCr5

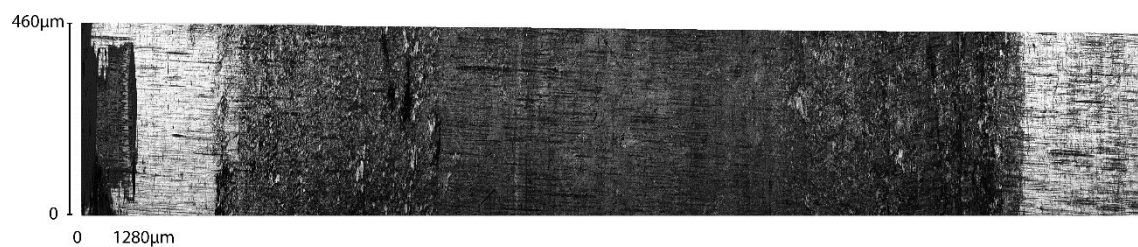
## 5.7 Snímky z LSCM mikroskopu

Snímky z mikroskopu byly ve formátu JPG. Snímky nebyly nijak spojeny, bylo nutné spojit je v grafickém editoru. Počty snímků na jednotlivé plochy nástroje se lišily. Ze snímků lze vyčíst základní informace.

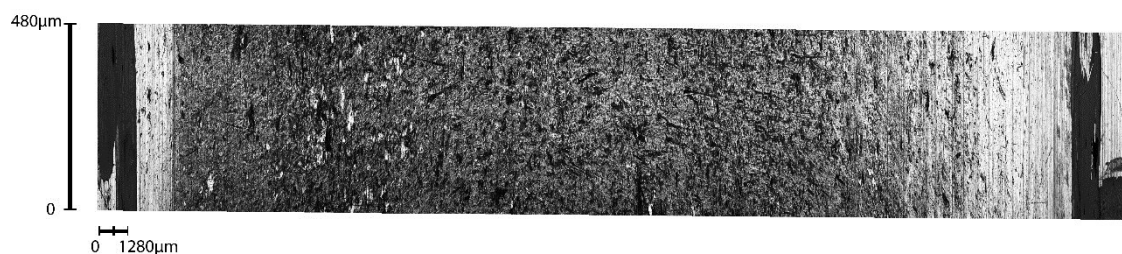
Jednotlivé snímky obsahují stopy po broušení. Ty jsou patrné na povrchu, který nebyl opotřebováván (světlejší krajové části snímků).

V krajních částech snímků najdeme také stopy po použitém markeru (obrázek 5.12) – výrazně tmavé zbarvení. Tyto stopy byly na každém nástroji a sloužily ke správnému ustavení polotovaru, a mimo jiné také jako určující hranice, od které probíhalo odměřování.

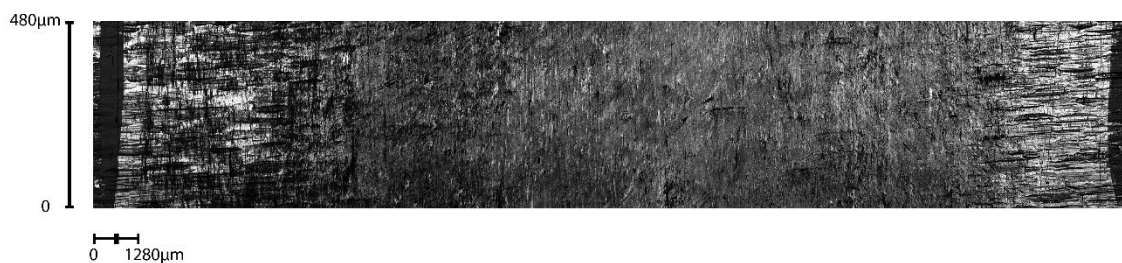
Patrné jsou také stopy po tvářených polotovarech, které opotřebovávaly plochu. Na některých snímkách je dobře rozeznatelný směr probíhající abraze materiálu polotovaru (obrázek 5.14).



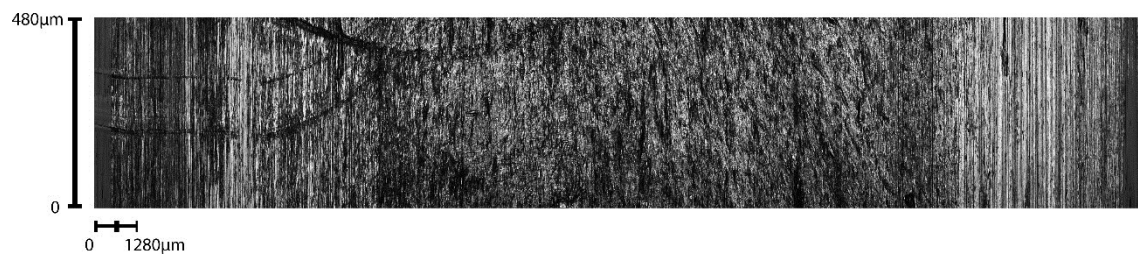
Obrázek 5.11: X210Cr12 (-1\_H ch1)



Obrázek 5.12: X210Cr12 (-2\_H ch1)



Obrázek 5.13: 60WCrV7 (-1\_H ch1)

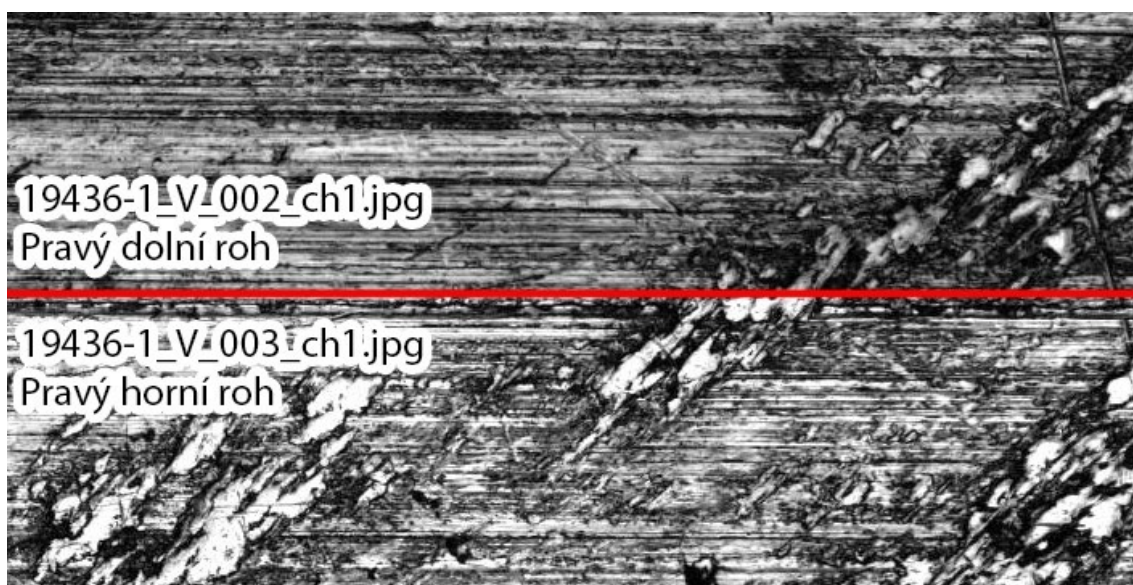


Obrázek 5.14: 60WCrV7 (-2\_H ch1)



Jednotlivé obrázky, ze kterých se skládá výsledný snímek, jsou jasově nevyvážené. Proto na některých snímcích můžeme vidět „proužkování“ to je patrné na obrázcích (obrázek 5.16 nebo obrázek 5.17). Jelikož jsou jednotlivé spojené snímky velmi malé, je detail jasového nevyvážení ilustrován na obrázek 5.15 jako výřez ze dvou pořízených snímků. Na obrázku je dobře pozorovatelný nejen velký jasový rozdíl, ale i ostrost snímků. Domnívám se, že osvětlení mikroskopu ovlivnilo výsledky měření.

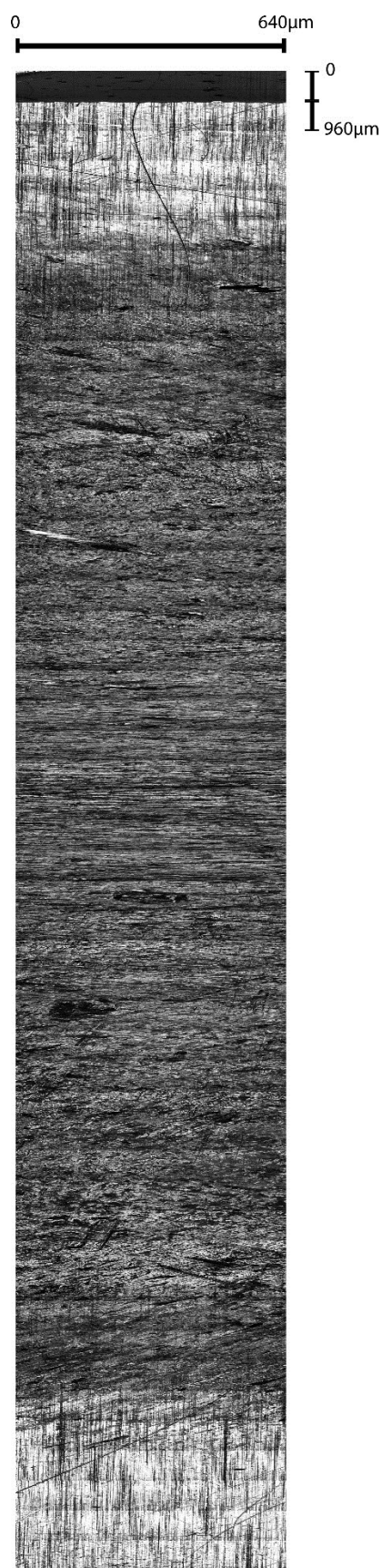
Na jednotlivých snímcích (obrázek 5.11 až obrázek 5.19) jsou patrné i vrypy. Tyto vrypy byly způsobeny manipulací s nástroji. Jedná se o poškození nástrojů, ke kterému dochází v běžné výrobě. Tyto vrypy mohly ovlivnit měření technologií MMM – Metal Magnetic Memory.



Obrázek 5.15: Detail nevyváženosti osvětlení snímků



Obrázek 5.16: X210Cr12 (-1\_V ch1)



Obrázek 5.17: X210Cr12 (-2\_V ch1)





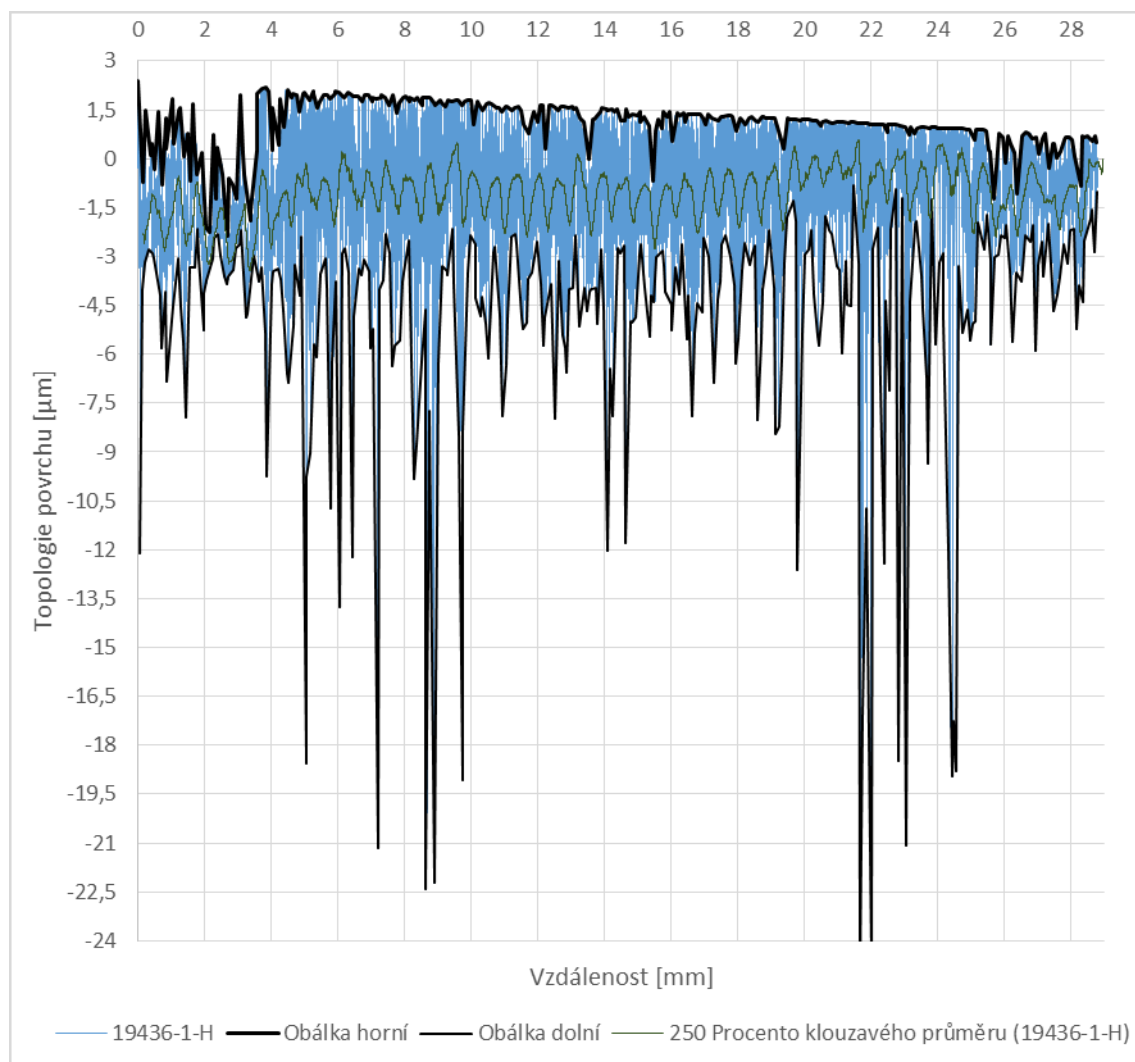
Obrázek 5.18: 60WCrV7 (-1\_V ch1)



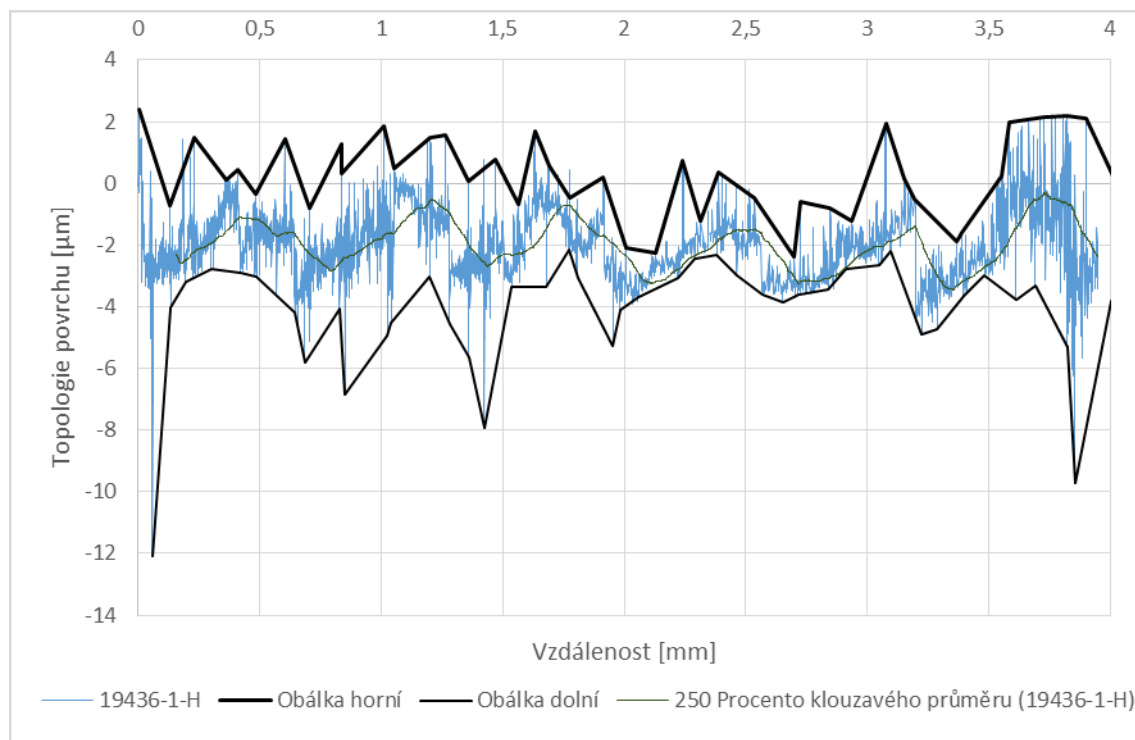
Obrázek 5.19: 60WCrV7 (-2\_V ch1)

## 5.8 Grafy získané z měření LSCM

Dle postupů načrtnutých v kapitole 4.8, jsem zpracoval naměřená data. Výsledný graf 5.21 je pro materiál X210Cr12. Při zpracování dat jsem dospěl k názoru, že takto detailní měření nepřináší kýžený efekt a je moc podrobné. Jeho zpracování se stává náročné jak časově, tak na výpočetní výkon a software. Mimo to vyvstávají další problémy, jako například zavedení dalších korekcí. Ukázalo se, že data jednotlivých snímků na sebe přímo nenavazují. Jsou skokově posunuty – tento posun přisuzuji špatnému nasvícení měřené desky a to vedlo ke zkreslení naměřených hodnot. Posuny lze sledovat i na křivce klouzavého průměru. Pro detailnější pohled viz graf 5.22.

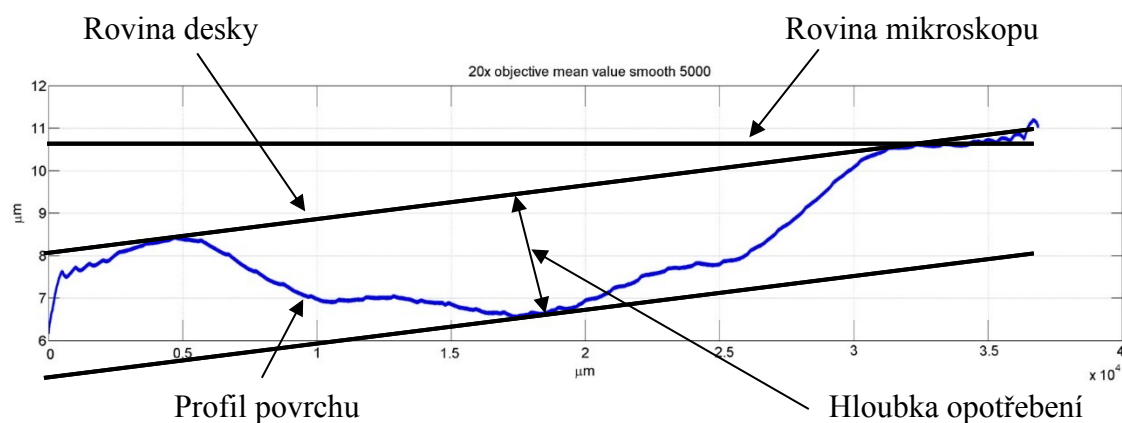


Graf 5.21: Graf z dat získaných metodou LSCM pro X210Cr12 (-1-H)



Graf 5.22: Detail měření z LSCM

Jako výhodnější se jeví snímání povrchu stejnou technologií, ale s menším rozlišením. Z těžko zpracovatelného souboru dat graf 5.21, se stane snadno přehledný, viz obrázek 5.20.

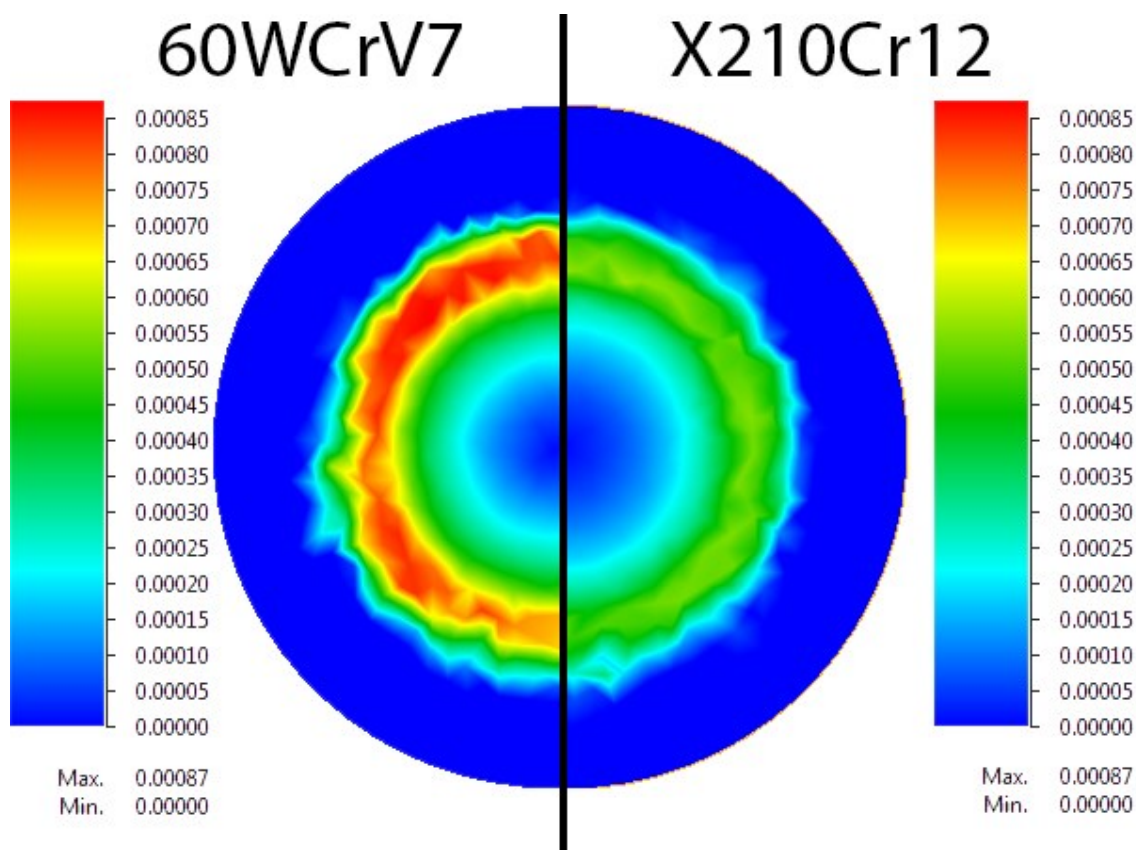


Obrázek 5.20: Zpracovaný snímek z LSCM s nižším rozlišením

Z obrázku (obrázek 5.20) lze snadno zjistit topologii povrchu na měřeném úseku. Na první pohled je patrné opotřebení, jeho tvar a velikost. Dobře rozeznatelný je i sklon povrchu k rovině měření.

Tento způsob měření se jeví jako optimální. Bohužel nebylo možné změřit topologii během experimentu. Měření LSCM proběhlo až po skončení a to s určitým časovým odstupem. Vypovídající schopnost je tak omezena.

## 5.9 Data získaná z numerického modelu pro tvářený materiál S355J2G3

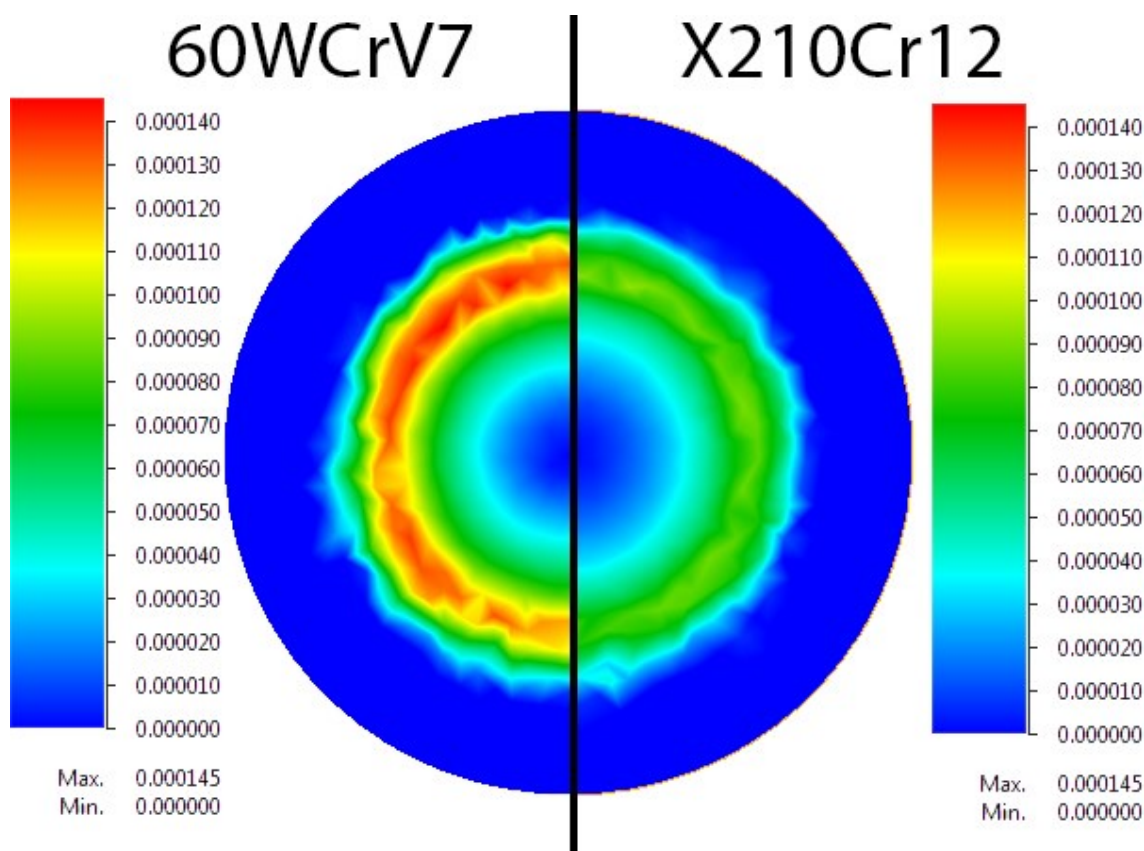


Obrázek 5.21: Porovnání výsledků pressure runout materiálu 60WCrV7 a X210Cr12 při tváření S355J2G3

Na obrázku (obrázek 5.21) je vidět, že nástroj na levé straně obrázku 60WCrV7 by měl být opotřebován více, než je tomu u druhého nástroje (vpravo na obrázku) tvářící stejný polotovar S355J2G3. Opotřebení podle tlakového modelu by mělo být největší blízko hrany válečku ve směru jejího zvětšování, a úbytek by měl být vyšší u nástroje 60WCrV7.

Pro materiál 60WCrV7 je maximální hodnota opotřebení cca  $0,00087\text{ m}$ , což je  $0,870\text{ mm}$  ( $870\text{ }\mu\text{m}$ ). Tato hodnota je lokalizována na hraně válečku. Pokud se zaměřím na střed nástroje, pak hodnota opotřebení dosahuje hodnoty  $5,25 \cdot 10^{-6}\text{ m}$ , což je  $5,25\text{ }\mu\text{m}$ . Z průběhu experimentu je ale patrné, že nejvíce se opotřebovává střed nástroje, kde je zároveň i střed polotovaru.

Materiál X210Cr12 dosahuje maximální hodnotu opotřebení cca  $0,00055\text{ m}$ , což je  $0,550\text{ mm}$  ( $550\text{ }\mu\text{m}$ ). Oblast maxim je obdobná jako pro předchozí materiál. Na středu nástroje se dosahuje hodnoty  $2,95 \cdot 10^{-6}\text{ m}$ , což je  $2,95\text{ }\mu\text{m}$ .



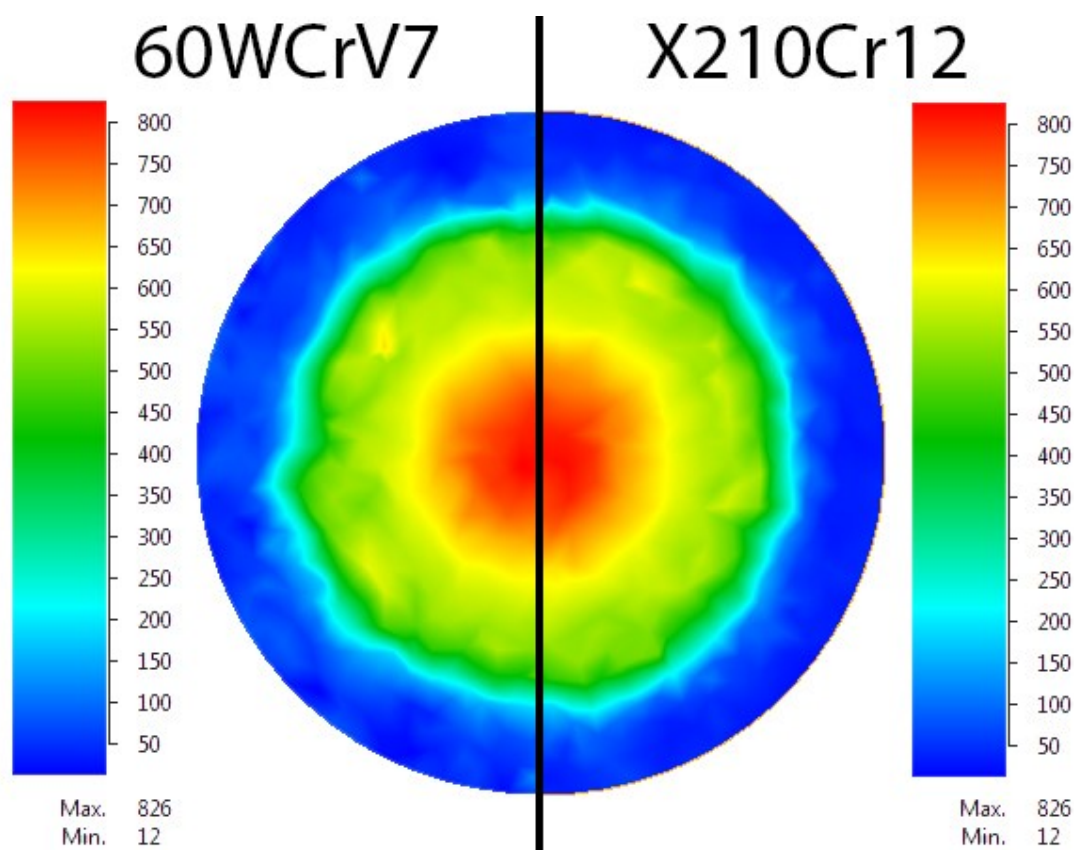
Obrázek 5.22: Porovnání výsledků traction runout materiálu 60WCrV7 a X210Cr12 při tváření S355J2G3

Na obrázku (obrázek 5.22) lze vidět podobný výsledek jako na předešlém obrázku (obrázek 5.21). Opotřebení podle trakčního modelu nástroje z materiálu 60WCrV7 bude vyšší, než opotřebení druhého nástroje z materiálu X210Cr12. Opotřebení podle trakčního modelu by mělo být největší blízko hrany válečku ve směru jejího zvětšování, a úbytek by měl být vyšší u nástroje 60WCrV7.



Hodnoty opotřebení 60WCrV7 je cca 0,000145 m, což je 0,145 mm (145  $\mu\text{m}$ ). Pokud se zaměříme na střed nástroje, pak hodnota opotřebení dosahuje hodnoty  $1,41 \cdot 10^{-7}$  m, což je 0,141  $\mu\text{m}$ . Z průběhu experimentu je ale patrné, že nejvíce se opotřebovává střed nástroje, kde je zároveň i střed polotovaru.

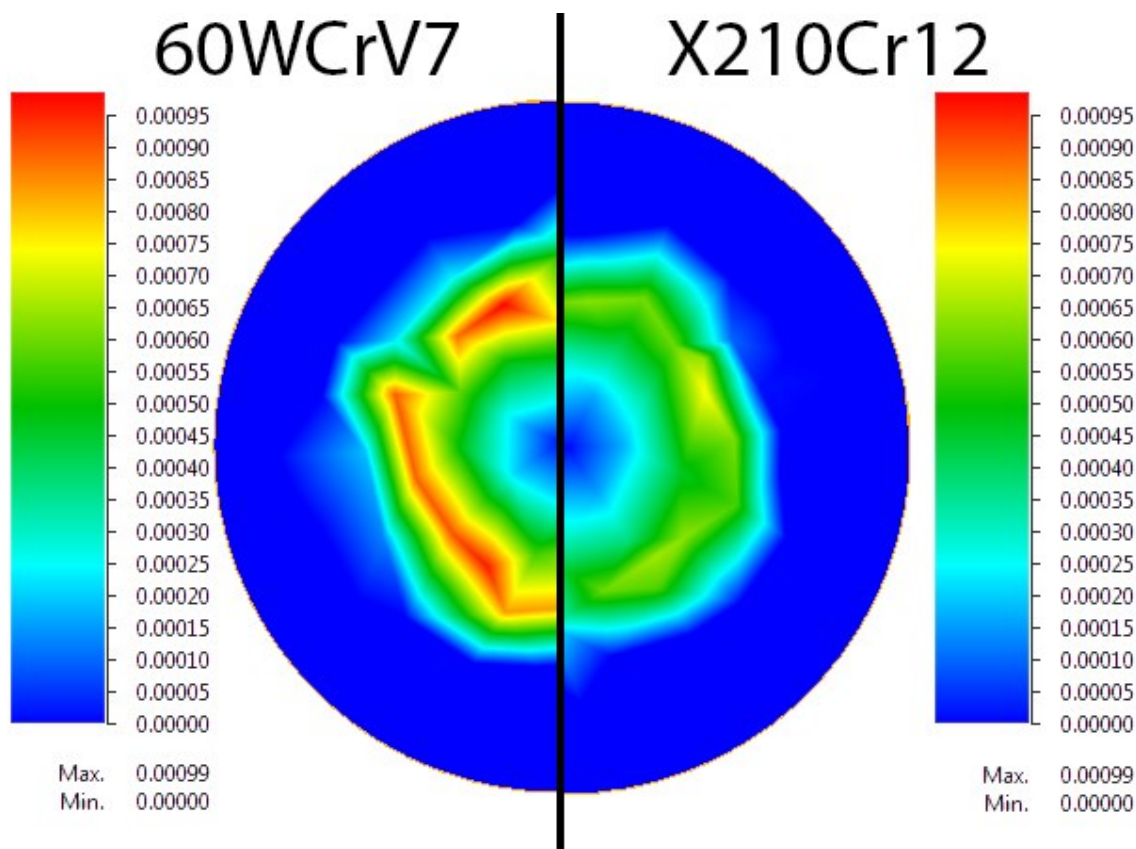
Pro materiál X210Cr12 je hodnota opotřebení cca 0,000091 m, což je 0,091 mm (91  $\mu\text{m}$ ). Oblast maxim je obdobná jako pro předchozí materiál. Na středu nástroje se dosahuje hodnoty opotřebení  $8,82 \cdot 10^{-8}$  m, což je 0,0882  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 5.23: Porovnání výsledků stress eff. materiálu 60WCrV7 a X210Cr12 při tváření S355J2G3

Obrázek 5.23 ilustruje rozložení efektivního napětí na oba nástroje. Tedy na nástroj spodní a horní tvářející stejný polotovar. Jak je vidět rozložení efektivního napětí je poměrně stejné pro oba nástroje. Maximální napětí je ve středu nástroje, směrem ven napětí klesá. Napětí na nástroji z X210Cr12 je cca 818 MPa a druhého nástroje 60WCrV7 825 MPa. Jedná se ale o „bodové“ hodnoty nástroje v plochách, kde je ve styku s polotovarem.

## 5.10 Data získaná z numerického modelu pro tvářený materiál 16MnCr5

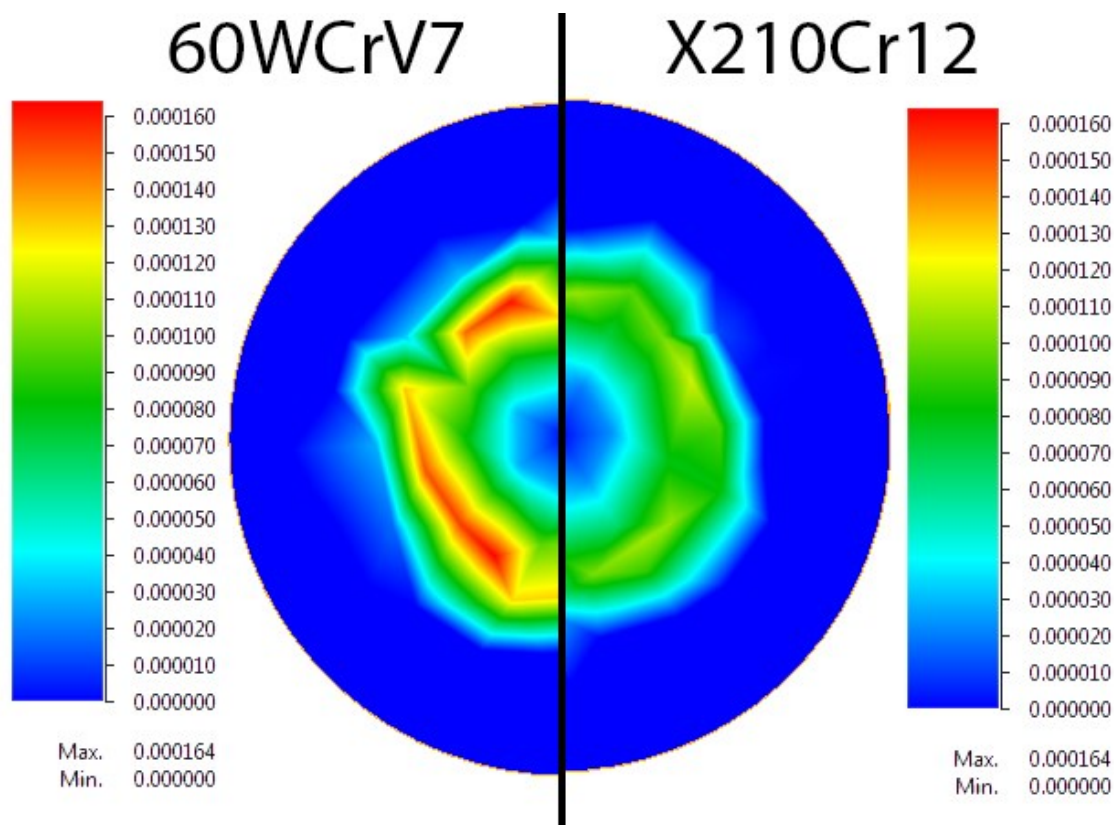


Obrázek 5.24: Porovnání výsledků pressure runout materiálu 60WCrV7a X210Cr12 při tváření 16MnCr5

Obrázek 5.24 ilustruje podobnou situaci jako obrázek 5.21. I zde je nástroj z 60WCrV7 více opotřebováván podle výpočtu pro tlakový model opotřebení. Nastala zde ale změna, výpočet již není „symetrický“ jako v předchozím případě. Jsou zde odchylky a v některých místech dochází k výpočtu větších hodnot opotřebení.

Nástroj z materiálu 60WCrV7 se dostává v maximech na hodnotu 0,00096 m, což je 0,960 mm (960  $\mu\text{m}$ ), pouze v několika malých ploškách nástroje, z větší části je nástroj opotřebován na hodnotu cca 0,00080 m (0,800 mm, 800  $\mu\text{m}$ ). Pokud se zaměřím na oblast středu, která je dle experimentu nejvíce opotřebovávána, dosahují hodnoty opotřebení  $1,47 \cdot 10^{-5}$  m, což je 14,7  $\mu\text{m}$ .

Nástroj z materiálu X210Cr12 se dostává v maximech na hodnotu 0,00074 m (0,740 mm, 740  $\mu\text{m}$ ) v jednom bodě nástroje. Častěji dosahuje hodnot 0,00060 (0,600 mm, 600  $\mu\text{m}$ ). Pokud se zaměřím na oblast středu, která je dle experimentu nejvíce opotřebovávána, dosahují hodnoty opotřebení  $6,83 \cdot 10^{-6}$  m, což je 6,83  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 5.25: Porovnání výsledků traction runout materiálu 60WCrV7a X210Cr12 při tváření 16MnCr5

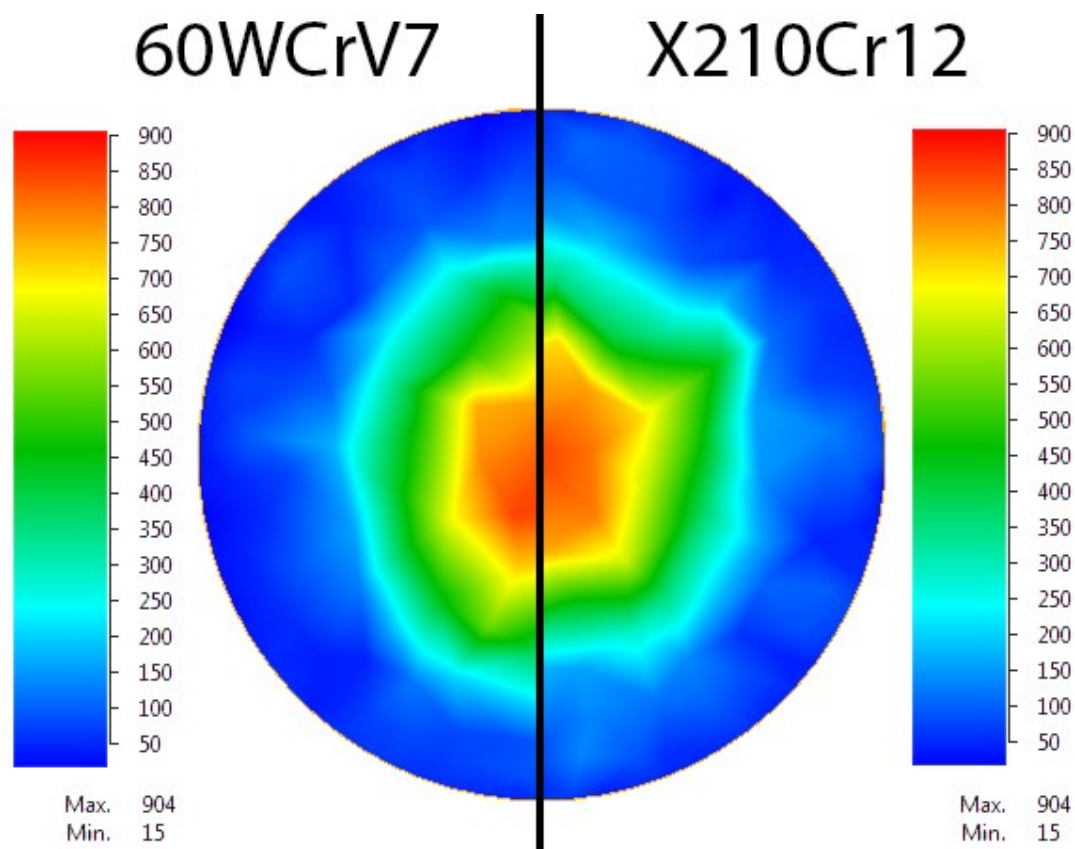
Na obrázek 5.25 je patrná stejná nesouměrnost jako na obrázek 5.24 – je tvářen stejný druh polotovaru. Zato hodnoty opotřebení dle trakčního modelu jsou i zde podobné předchozímu obrázku (obrázek 5.24).

Nástroj z materiálu 60WCrV7 dosahuje vyšších hodnot opotřebení 0,000164 m (0,164 mm, 164  $\mu\text{m}$ ) ve velmi úzké ploše nástroje. Častěji se hodnota opotřebení pohybuje v rozmezí 0,00009÷0,000140. V oblasti středu je dosahováno hodnoty opotřebení  $3,58 \cdot 10^{-7}$  m, což je 0,358  $\mu\text{m}$ .

U druhého nástroje z materiálu X210Cr12 dochází k menším hodnotám opotřebení. Maximální hodnota se zde zobrazuje cca 0,000115 m (0,115 mm, 115  $\mu\text{m}$ ), ale častěji



se hodnota opotřebení pohybuje v rozmezí  $0,00009 \div 0,000103$ . V oblasti středu je dosahováno hodnoty opotřebení  $2,21 \cdot 10^{-7}$  m, což je  $0,221 \mu\text{m}$ .



Obrázek 5.26: Porovnání výsledků stress eff. materiálu 60WCrV7 a X210Cr12 při tváření 16MnCr5

Obrázek 5.26 nám ilustruje rovnoměrné rozložení efektivního napětí v obou nástrojích. Situace je zde velmi podobná jako na obrázku (obrázek 5.23). Maximální napětí je ve středu nástroje, směrem ven (ke krajům nástroje) napětí klesá. Napětí na nástroji z X210Cr12 je cca 842 MPa a druhého nástroje 60WCrV7 848 MPa. Jedná se ale o „bodové“ hodnoty nástroje v plochách, kde je ve styku s polotovarem. Stejně jak v předešlém případě při tváření vzorků z S355J2G3, i zde jsou větší hodnoty efektivního napětí na nástroji z materiálu 60WCrV7.

## 5.11 Shrnutí údajů z numerického modelu

Pro snadnější orientaci v hodnotách opotřebení jsem shrnul výsledky do přehledné tabulky (tab. 5.2).

Je důležité si uvědomit, že numerický model odráží stav pouze pro první tvářený kus. Vypovídající schopnost je tak velmi omezena. Z numerického modelu je patrné, že největších hodnot opotřebení se dosahuje blízko okraje polotovaru a to jak podle trakčního, tak podle tlakového modelu. Přitom dle naměřených dat z experimentu je dosahováno největšího opotřebení ve středu nástroje.

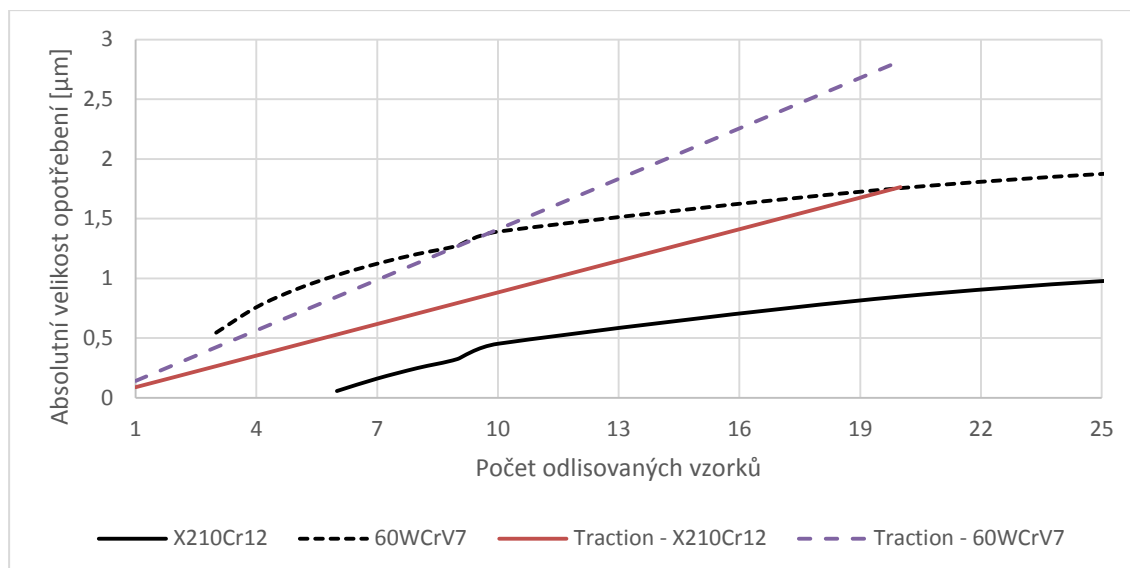
Tab. 5.2: Přehled hodnot opotřebení

<b>Druh výpočtu a umístění</b>	<b>Hodnota opotřebení [<math>\mu\text{m}</math>]</b>			
	S355J2G3		16MnCr5	
	60WCrV7	X210Cr12	60WCrV7	X210Cr12
Traction model max.	145	91	164	115
Traction model střed	0,141	0,0882	0,358	0,221
Runout model max.	870	550	960	740
Runout model střed	5,25	2,95	14,7	6,83

Na začátku tváření bude převládat tlakový model opotřebení, po odlisování více kusů bude převládat kombinace tlakového a trakčního modelu.

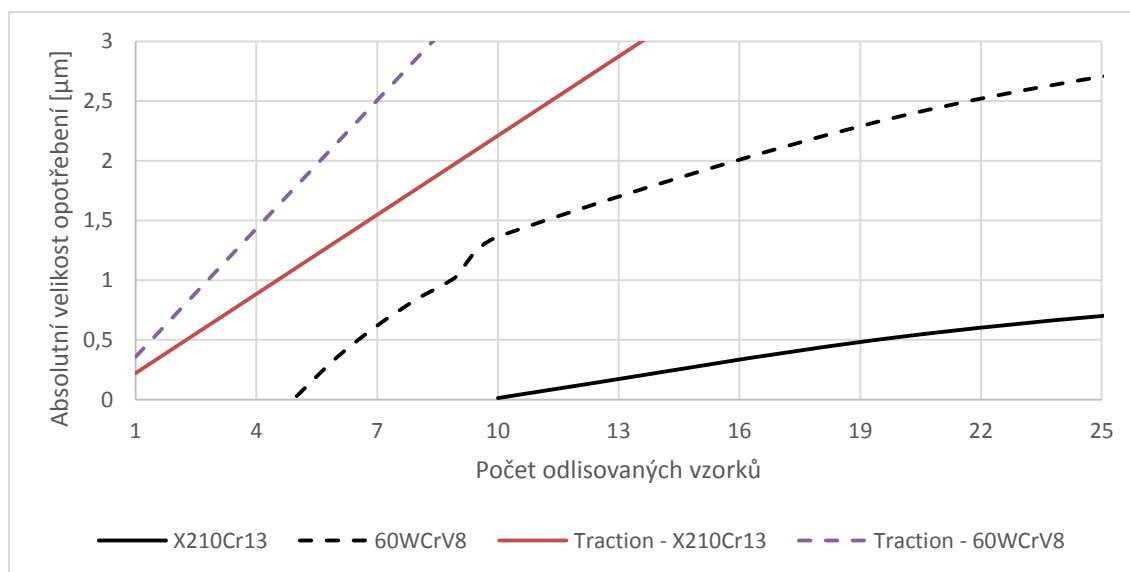
Jelikož jsem neprovedl měření povrchu desky před začátkem lisování polotovarů, ale až po odlisování prvních 10 ks, tak nemohu zachytit prvotní fázi tvorby opotřebení. Porovnal jsem vývoj opotřebení nástrojů dle výsledků z výpočetního programu. Výsledkem jsou dva grafy (graf 5.23 a graf 5.24), které se soustředí na začátek opotřebení. Měření probíhalo až po odlisování 10 ks - hodnoty v grafech před 10 ks jsou dopočtené.

Graf 5.23 pro tvářený materiál S355J2G3 ukazuje poměrně dobrou shodu naměřených dat a numerického modelu pro materiál nástroje 60WCrV7. Oproti tomu nástroj z X210Cr12 se rozchází s numerickým modelem.



Graf 5.23: Detail vývoje opotřebení pro tvářený materiál S355J2G3

Pro tvářený materiál 16MnCr5 (graf 5.24) se naměřená data rozcházejí s výsledky z numerického modelu.



Graf 5.24: Detail vývoje opotřebení pro tvářený materiál 16MnCr5

Je důležité si uvědomit, že numerický model poskytl údaj pro první odlisovaný kus. Křivky vytvořené z numerického modelu jsou lineárně závislé na počtu kusů. V praxi přitom neexistuje lineární závislost mezi počtem odlisovaných kusů a velikostí opotřebení.

## 5.12 Porovnání naměřené teploty pomocí termovizní kamery a výsledků výpočtu numerického modelu

Prvotní výpočet numerického modelu procesu pěníování proběhl v softwaru QForm 3D verze 5.1.1.0621. Zde došlo k viditelnému rozdílu naměřených teplot. S přístupem k novější verzi QForm 3D verze 7.1.4261 proběhl ověřovací výpočet stejné sestavy prvků. Výsledek numerického modelu a reálného procesu je k zhlédnutí na následujících obrázcích (obrázek 5.27 a obrázek 5.28).

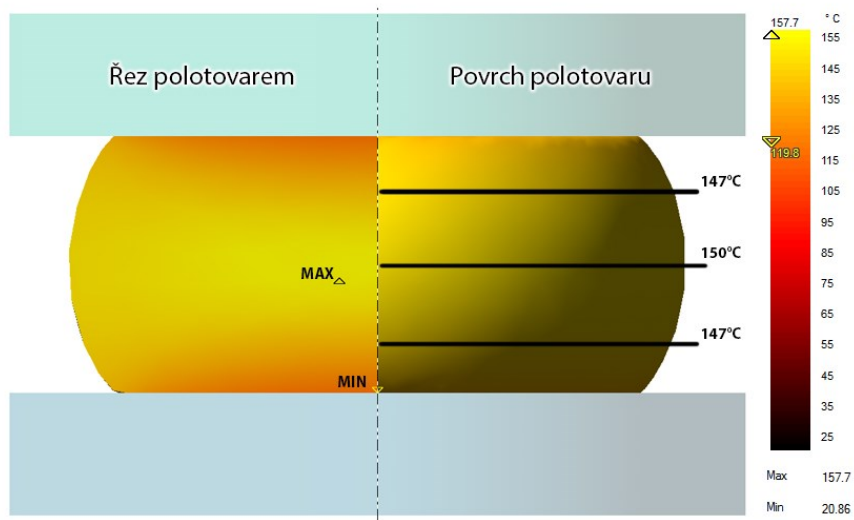
Obrázek 5.27 zobrazuje rozdíl mezi naměřenými teplotami v reálném prostředí a numerickým modelem. Je zde viditelný rozdíl teplot, kdy numerický model oproti reálnému procesu vykazuje rozdíl cca 130 °C u starší verze výpočetního programu. Novější verze výpočetního programu je rozdílná pouze o cca 100 °C. Je tedy viditelné zlepšení přesnosti numerického modelu.

Obrázek 5.28 zobrazuje rozdíl mezi naměřenými teplotami v reálném prostředí a numerickým modelem. Můžeme pozorovat jistou analogii k předchozímu obrázku (obrázek 5.27). Numerický model zde vykazuje podobný rozdíl teplot jako v předchozím případě. Starší verze výpočetního softwaru vykazuje rozdíl 150 °C. Novější verze výpočetního programu je přesnější, rozdíl nepřesnosti je cca 100 °C.

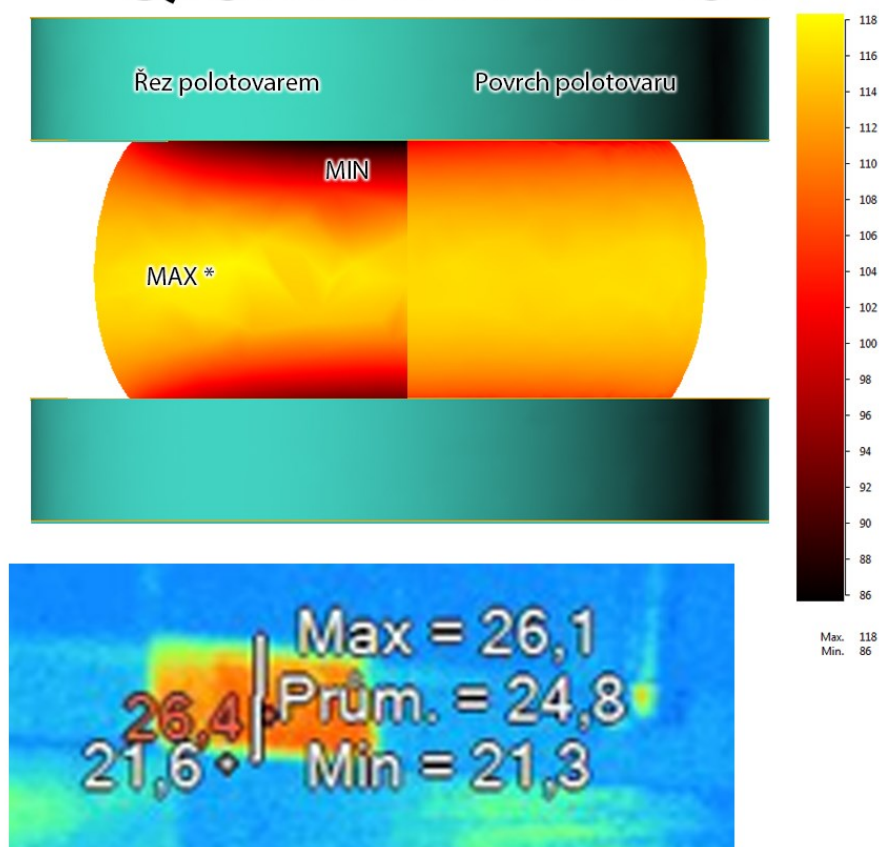
Rozdíl mezi oběma verzemi výpočetního programu je u obou druhů polotovaru v rozmezí 40 ÷ 50 °C. Za posunem teplot bude zřejmě propracovanější knihovna materiálů, kde v novější verzi softwaru jsou materiálové vlastnosti lépe popsány.

Je důležité si uvědomit, že teplota měřená pomocí termokamery neodráží skutečnou teplotu polotovaru. Na polotovaru se formují jednotlivé vrstvy, které mají rozdílné vlastnosti pro vedení tepla. Abych získal hodnověrné údaje, bylo by třeba měřit teplotu pomocí dotykových čidel. Jako vhodné se jeví termoelektrické teploměry, jejich použití a vlastnosti popisuje norma ČSN EN 60584-1 ed. 2 - Termoelektrické články - Část 1: Údaje napětí a tolerance.

# Qform v.5.1.1.0621

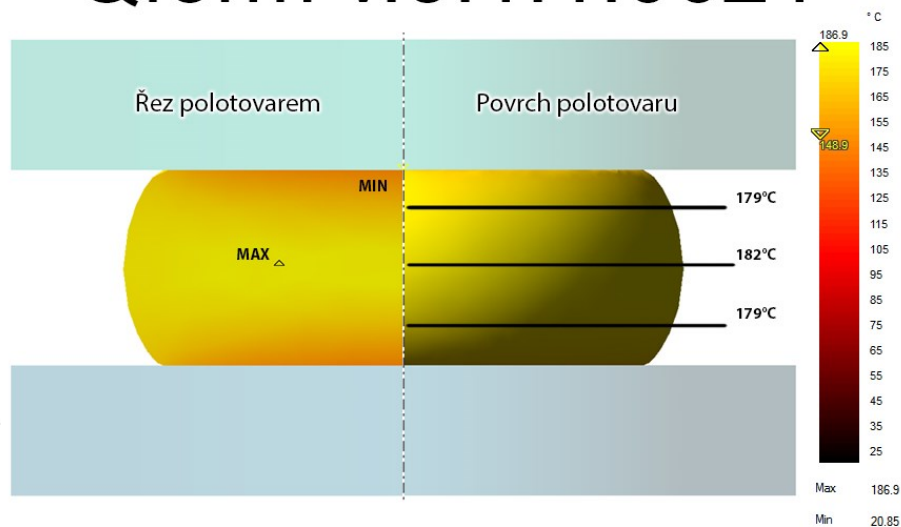


# Qform v.7.1.4261

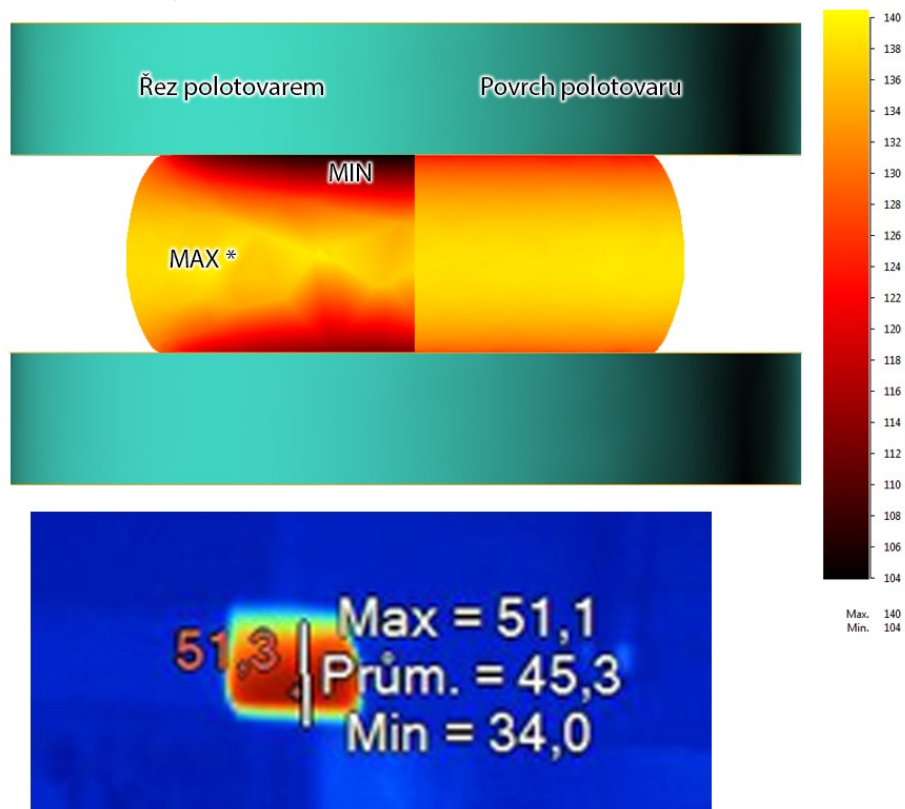


Obrázek 5.27: Porovnání teplot numerického modelu a reálného procesu na materiálu S355J2G3

# Qform v.5.1.1.0621



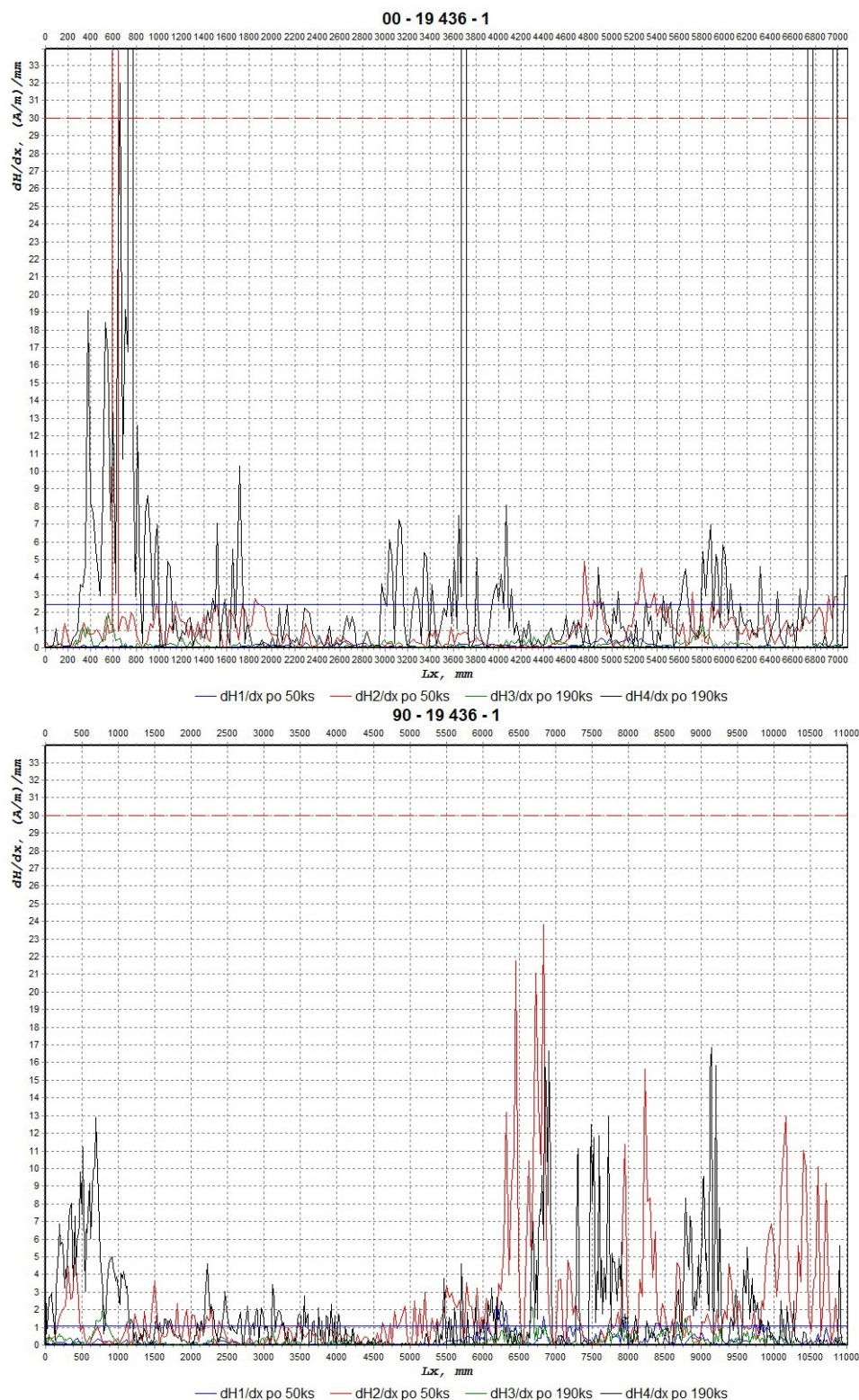
# Qform v.7.1.4261



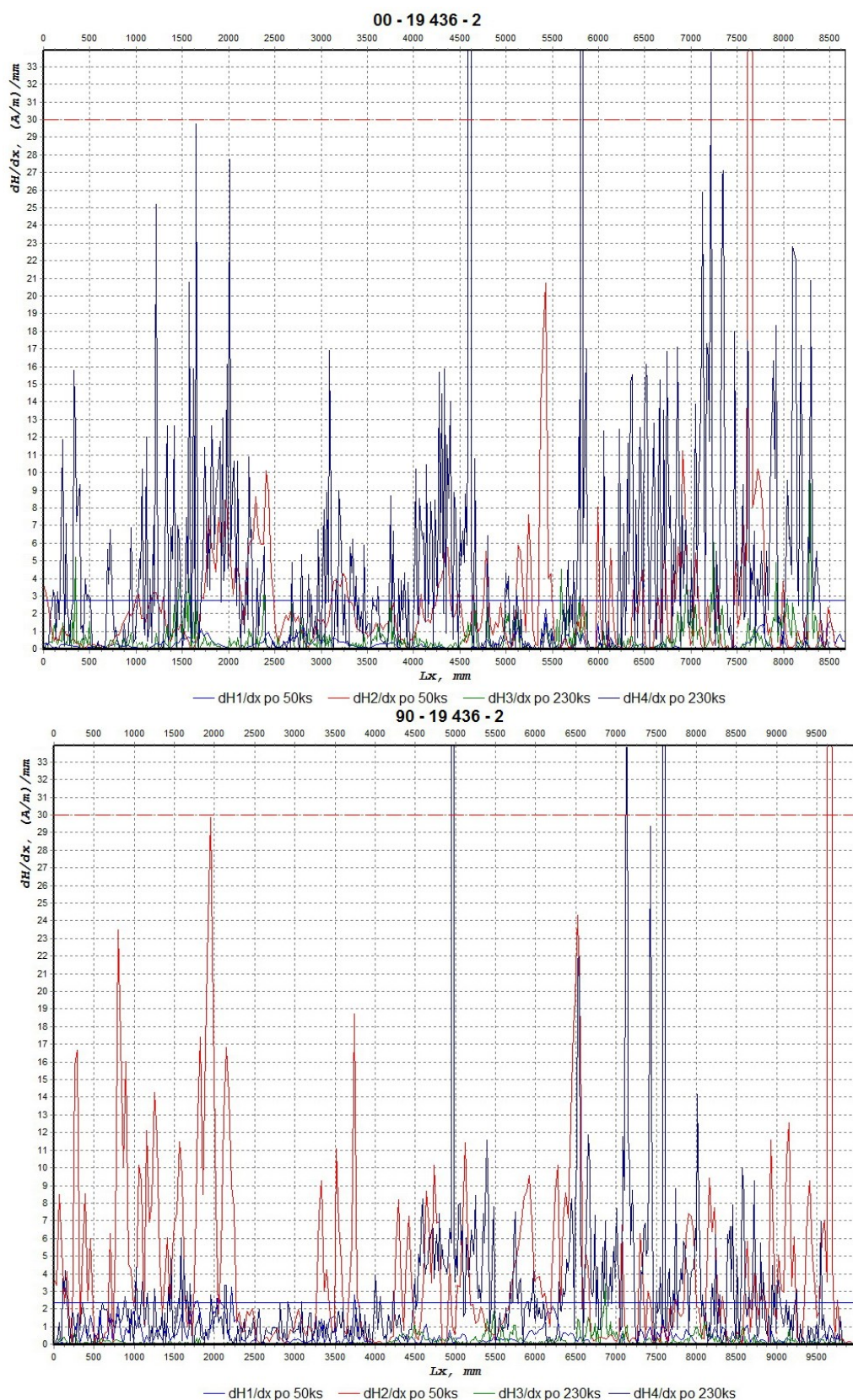
Obrázek 5.28: Porovnání teplot numerického modelu a reálného procesu na materiálu 16MnCr5



## 5.13 Naměřené údaje metodou MMM



Obrázek 5.29: Nástroj z materiálu X210Cr12, lisován materiál S355J2G3, porovnání měření po 50 ks a 190 ks



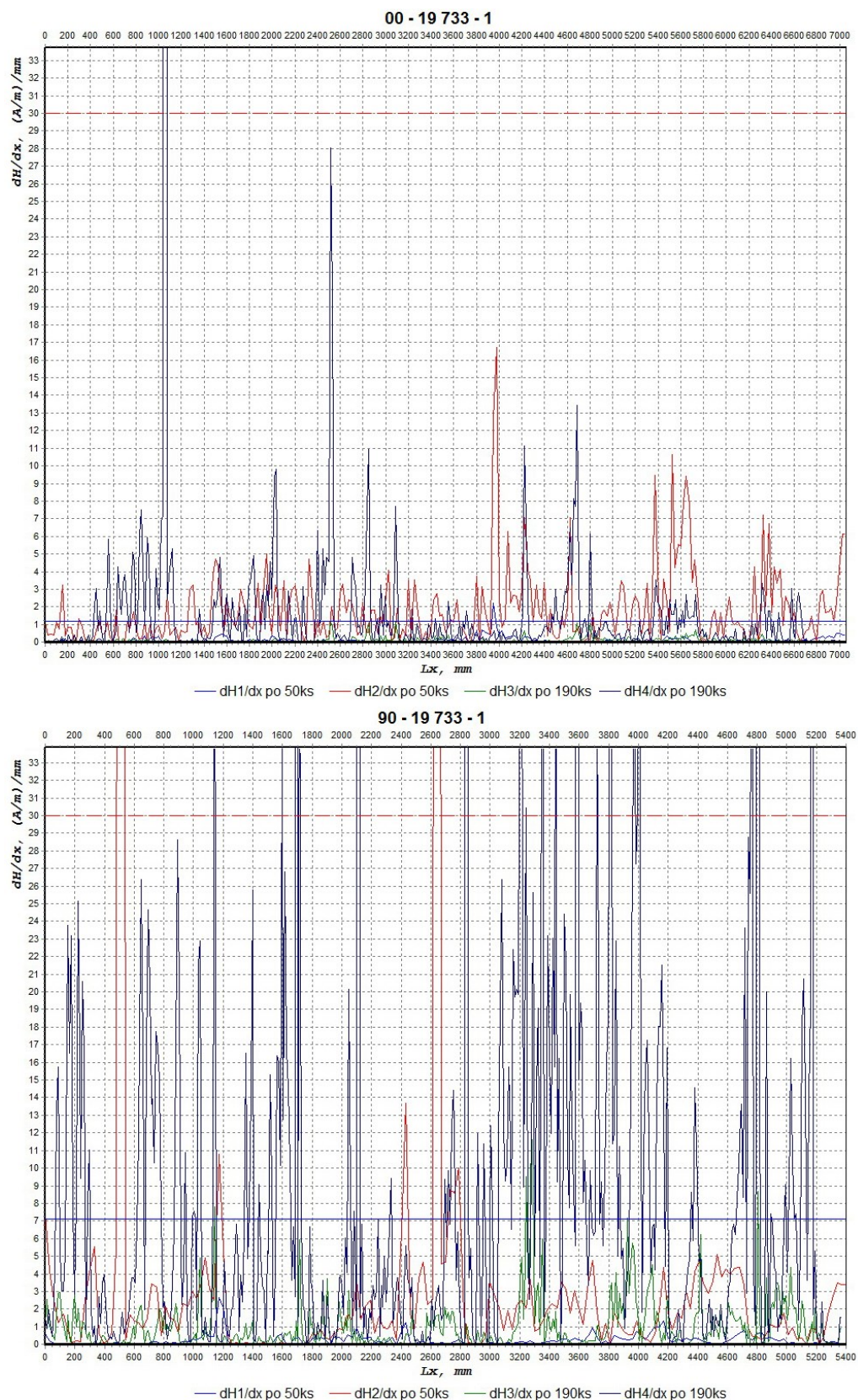
Obrázek 5.30: Nástroj z materiálu X210Cr12, lisován 16MnCr5,  
porovnání měření po 50 ks a 230 ks



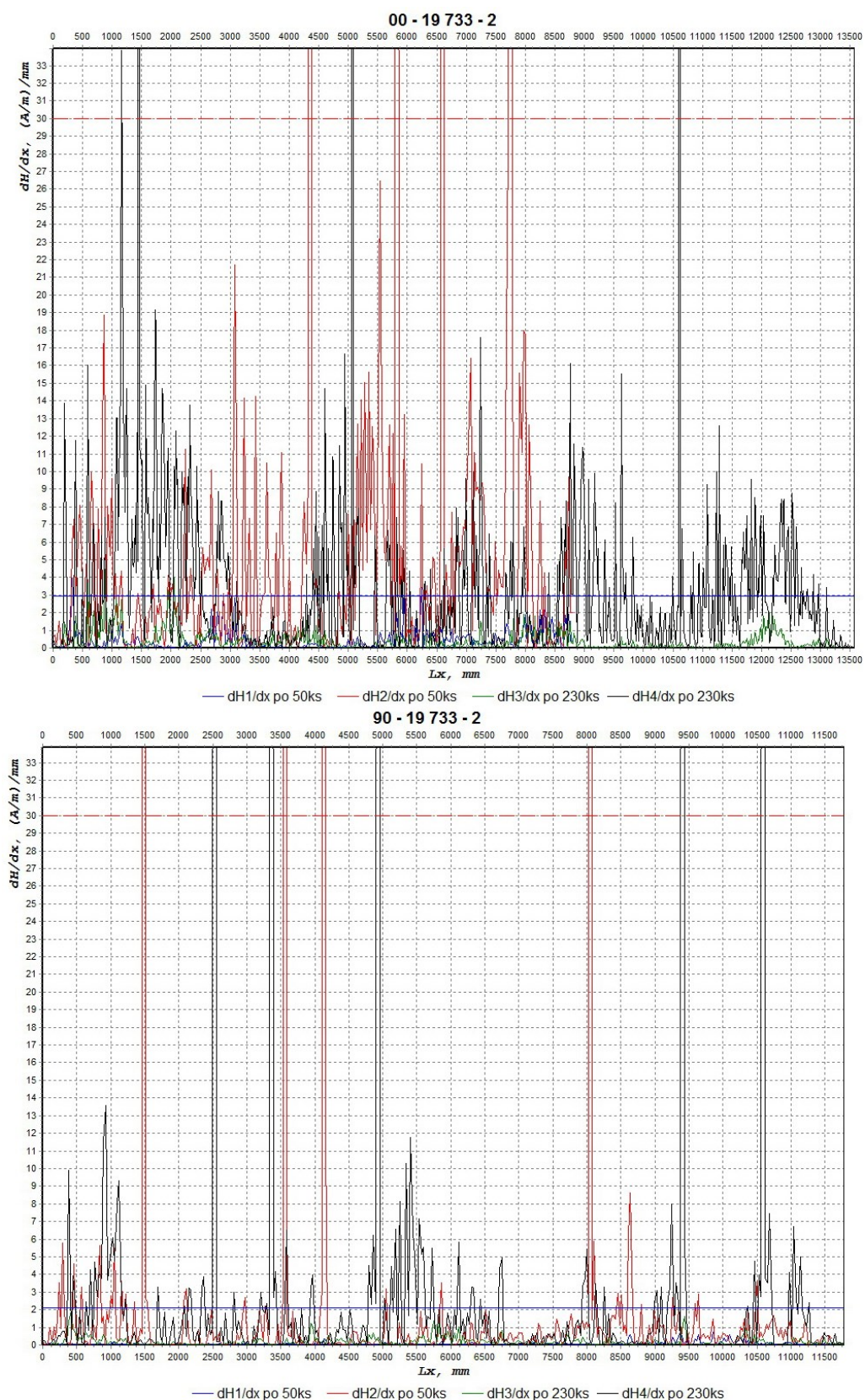
Na obrázku (obrázek 5.29) je patrné, že naměřená úroveň gradientu magnetického pole pro měření rovnoběžné na značení (horní část obrázku) přesáhla výrobcem stanovenou mez. Je dobře pozorovatelný nárůst magnetického gradientu. Měření kolmé na značení (dolní část obrázku) mez nepřesáhlo. Ukazuje velmi podobné hodnoty magnetického gradientu jak po odlisování 50 ks, tak po 190 ks.

Dle magnetografů (obrázek 5.30) je patrný pravděpodobný výskyt trhlin již po odlisování 50 ks polotovarů v obou směrech měření. Z průběhu jednotlivých křivek soudím zvýšený rozvoj napětí (indikující trhliny) po odlisování 230 ks, a tendenci zhoršování stavu lisovacího nástroje to platí hlavně pro horní magnetograf – měřeno rovnoběžně na značení. Ve spodním magnetografu, po odlisování 230 ks, dochází ke snížení počtu překročení hranic 30 A/m/mm.

Jelikož je prováděn ruční posuv měřící sondy, nejsou osy  $L_x$  nijak určující. Nemohu tak zpětně označit místo, kde dochází ke zvýšení magnetického gradientu pole. To platí nejen pro obrázek 5.29 a obrázek 5.30, ale i následující obrázek 5.31 a obrázek 5.32.



Obrázek 5.31: Nástroj z materiálu 60WCrV7, lisován materiál S355J2G3, porovnání měření po 50 ks a 190 ks



Obrázek 5.32: Nástroj z materiálu 60WCrV7, lisován 16MnCr5,  
porovnání měření po 50 ks a 230 ks

Dle horního magnetografu (obrázek 5.31) je patrný nárůst magnetického pole po odlisování 190 ks, to se již projeví v překročení stanovené meze. Můžeme očekávat výskyt trhlin. Na spodním magnetografu vidíme poměrně vysoké hodnoty magnetického pole již po odlisování 50 ks. Při druhém měření (po 190 ks) v témže místě jsou hodnoty magnetického pole zřetelně vyšší. Dochází tedy k většímu poškození nástroje.

Oba magnetografy na obrázek 5.32 zobrazují překročení stanovené meze jak po odlisování 50 ks, tak i po 230ks. Průběhy jednotlivých křivek jsou si velmi podobné.

## 6 Závěry

Je nutné si uvědomit, že nejsme schopni vytvořit tak komplexní numerické modely, které by v sobě zahrnovaly všechny proměnné faktory. Značnou část parametrů již napodobíme, bohužel lidský faktor a okolí je náhodné. Výsledky numerických modelů tak musíme brát s jistou dávkou nespolehlivosti.

Je důležité si uvědomit, že aktuální systémy výpočtů typu MKP (metody konečných prvků) se zaměřuje na výpočet numerického modelu pouze pro první tvářený kus. Neumožňuje vyšetření stavu ploch a jednotlivých parametrů v čase – s větším počtem odpěchovaných vzorků, což je pro tento účel stěžejní.

### 6.1 Vyhodnocení porovnání dosahovaných sil při tváření materiálů S355J2G3 a 16MnCr5

Tento údaj nám neposkytne žádné relevantní údaje o stavu pracovních ploch nástrojů. Pokud se podíváme na obrázky a grafy v kapitole 5.1, tak je vidět, že síly se mění náhodně. Neplatí tedy, že čím více opotřeбенá plocha, tím větší síla je potřebná. Tento předpoklad se ukázal jako nepravdivý.

Viditelné rozptyly sil u nerovnoměrně rozložených mechanických vlastností, jsou dobře patrné u materiálu 16MnCr5, u kterého docházelo k jeho praskání. U tohoto materiálu je rozptyl dosahovaných sil cca 150 kN. Oproti tomu u materiálu S355J2G3 je rozptyl dosahovaných sil daleko menší, cca 60 kN.

Podle rozptylu naměřených sil, bychom tedy mohli vyvodit závěr o homogenitě tvářeného polotovaru.

## 6.2 Vyhodnocení měření úbytků

Profily byly měřeny v ose na značení nástroje a kolmo na značení nástroje. V ideálním případě, kdy by byly nástroje proti sobě ideálně vedeny, a jejich vlastnosti byly homogenní a polotovary měly stejné mechanické vlastnosti v celém svém objemu, byly by zjištěné křivky symetrické. Toho však v praxi není možné dosáhnout. Nebylo to ani účelem experimentu.

Jako zásadní se jeví kvalitní úprava povrchu nástroje, jeho rovnoběžnost pro získání správných hodnot opotřebení, rozlišení měřicího aparátu, lidské obsluhy. Zkreslení výsledků je zatíženo nepřesností výpočetních metod.

### 6.2.1 Vyhodnocení měření úbytků pro nástroje z X210Cr12

Materiál nástroje X210Cr12 tvářející polotovar S355J2G3 dosahuje maximální velikosti opotřebení  $-2,776 \mu\text{m}$ . Jednotlivé změřené profily byly vůči sobě posunuté a rozkolísané. To zapříčinilo nedostatečně tuhé vedení nástrojů vůči sobě, případně nepřesně umístěný polotovar.

Hodnota opotřebení nástroje z materiálu X210Cr12 tvářející polotovar 16MnCr5 dosahuje hodnoty  $-2,87 \mu\text{m}$ . K maximálnímu opotřebení docházelo blízko středu polotovaru, nástroje. Jednotlivé změřené profily byly vůči sobě posunuté a rozkolísané. To zapříčinilo nedostatečně tuhé vedení nástrojů vůči sobě, případně nepřesně umístěný polotovar.

Pokud se zaměřím na graf 5.6 a graf 5.14 jsou si oba velmi podobné. V obou se tvoří dvě místa s dominantním opotřebením nástroje, tyto místa jsou blízko sebe. Je možné, že se jedná jen o anomálii vzniklou posunem profilů. Tomu odpovídá i výsledky z předběžného snímání na mikroskopu LSCM, které ukazuje, že největší míra opotřebení se vytváří ve středu polotovaru.



### **6.2.2 Vyhodnocení měření úbytků pro nástroje z 60WCrV7**

Materiál nástroje 60WCrV7 tvářející polotovar S355J2G3 dosahuje maximální velikosti opotřebení  $-3,652 \mu\text{m}$ . Jednotlivé křivky měření jsou vůči sobě posunuty a rozkolísány a to hlavně při měření ve směru na označení nástroje. Ve směru kolmém nevykazují takové rozdíly. Graf 5.9 je mírně posunutý k pravé straně, to přičítám nedostatečnému vedení nástrojů vůči sobě.

Materiál nástroje 60WCrV7 tvářející polotovar 16MnCr5 dosahuje maximální velikosti opotřebení  $-6,566 \mu\text{m}$ . To je téměř hodnota dvojnásobná oproti opotřebení při tvářenému S355J2G3. Při pohledu na graf 5.17 je vidět, že k maximálnímu opotřebení dochází téměř ve středu zkoumané plochy, tedy v oblasti, kde se nachází střed polotovaru.

Nejlépe ilustruje průběh hodnot opotřebení jednotlivých nástrojů graf 5.20. Podle grafu lze konstatovat, že velikost opotřebení nástrojů z X210Cr12 bude podobná jak pro tvářený materiál 16MnCr5, tak pro materiál S355J2G3. Naopak velikost opotřebení pro nástroj z materiálu 60WCrV7 bude daleko větší při tváření 16MnCr5. S355J2G3 bude opotřebovávat méně nástroj.

## **6.3 Vyhodnocení dat z LSCM**

### **6.3.1 Vyhodnocení snímků**

Pospojované snímky zachycují střed nástroje, tedy plochu neopotřeбенou, tak plochu, na které probíhá opotřebení. Na spojených snímkách lze rozeznat stopy po broušení, jednotlivé směry pohybu materiálu, různé vrypy atd. Na samostatné hodnocení životnosti nejsou podstatné. Při detailním pohledu lze rozeznat nerovnoměrné osvětlení snímaných ploch, ale i neostrost snímků. Spojené snímky slouží pouze k ilustraci.

### **6.3.2 Vyhodnocení grafů**

Zpracování dat za účelem získání detailního průběhu opotřebení je velice časově a výpočetně náročné a jeví se momentálně jako neefektivní. Mnohem výhodnější je provedení měření stejným zařízením, ale s menším rozlišením. Bohužel nebylo možné změřit topologii během experimentu. Měření LSCM proběhlo až po skončení a to s určitým časovým odstupem. Mezitím se na povrchu vytvořily korozní produkty a vypovídající schopnost měření je tak omezena.

## **6.4 Vyhodnocení snímků nástrojů ze stereo mikroskopu**

Tyto snímky jsou pouze ilustrující. Neobsahují žádné informace použitelné pro určení velikosti opotřebení. Snímky byly snímány třetí stranou, není tedy možné zjistit orientaci snímané desky.

### **6.4.1 Pro nástroje z X210Cr12**

Stopy po tváření polotovarech jsou jasně patrné. Pro materiál polotovaru S355J2G3 jsou stopy po tváření zřetelnější, než po tváření polotovarů z 16MnCr5. Stopy – rýhy jsou delší pro materiál S355J2G3. Jasně patrné jsou pohyby přetvářeného materiálu. To mohlo být zapříčiněno nedostatečným vedením nástrojů vůči sobě, popřípadě nehomogenitou tváření polotovarů.

### **6.4.2 Pro nástroje 60WCrV7**

Pro materiál polotovaru S355J2G3 jsou stopy po tváření zřetelnější, než po tváření polotovarů z 16MnCr5. Patrné jsou i pohyby přetvářeného materiálu, který do nástroje vydírá rýhy. Stopy – rýhy jsou delší, stejně jako v předešlém případě, pro materiál S355J2G3. To mohlo být zapříčiněno nedostatečným vedením nástrojů vůči sobě, popřípadě nehomogenitou tváření polotovarů.



## 6.5 Vyhodnocení údajů z numerického modelu

Numerický model odráží stav pouze pro první tvářený kus. Na začátku bude převládat tlakový model opotřebení, posléze kombinace trakčního a tlakového modelu. Přestože dle numerického modelu, pro všechny nástrojové materiály se předpokládá opotřebení blízko kraje polotovaru, změřené opotřebení je nejvyšší ve středu nástroje. Tomu odpovídá i rozložení efektivního napětí v nástroji.

Opotřebení jsou pro nástroje tvářící polotovar z materiálu S355J2G3 poměrně symetrické - ve tvaru kruhu. Oproti tomu nástroje tvářící materiál 16MnCr5 již není symetrické.

Rozložení efektivního napětí je ve všech nástrojích maximální ve středu nástroje, směrem k okrajům napětí klesá. Napětí je symetricky rozložené.

Nelze stanovit hodnotu opotřebení podle výsledku numerického modelování, neboť neodráží stav vzniklý větším počtem odlisovaných vzorků.

## 6.6 Diference teplot výsledků numerického modelování a procesu

Při analýze hodnot získaných při měření teploty zkušebních válečků a numerického modelu došlo ke zjištění rozdílu cca 100÷150°C. Tento významný rozdíl přisuzují výpočetním omezením výpočetního softwaru, kde nejsou zahrnuty všechny aspekty procesu, jako nelineární průběh rychlosti deformace, změna plochy, která odvádí teplo do okolí, popřípadě proudění vzduchu.

Údaj z termokamery je ovlivněn nejen jejím nastavením, ale i limity tohoto měření. Na polotovar se pravděpodobně během tváření tvoří jednotlivé vrstvy, která teplo přenáší rozdílně. Vhodnější je tedy ověřování teplot pomocí dotykových čidel.

Sekundárním poznatkem je zjištění, že novější verze výpočetního softwaru dosahuje hodnověrnějších výsledků při porovnání s naměřenými údaji. Domnívám se, že vyšší

přesnost novější verze výpočetního programu je způsobena zpřesněním materiálových vlastností v materiálové databázi programu.

## 6.7 Vyhodnocení výsledků MMM

Metoda Metal Magnetic Memory byla použita na měření dvou párů nástrojů. Měření bylo provedeno po 50 odlisovaných vzorcích (měření 1, sada 1 a 2) a po 190 vzorcích (měření 2, sada 1) či 230 vzorcích (měření 2, sada 2).

V tab. 6.1 jsou zeleně označeny nástroje, na kterých nebylo zjištěno překročení gradientu magnetického pole, červeně jsou označeny nástroje, na kterých byl gradient překročen – je tedy pravděpodobný výskyt trhlin. Označením OK se rozumí stejný význam jako zelené označení, tedy žádné překročení gradientu magnetického pole a pravděpodobně zde nedochází k poruše nástroje. Číselná hodnota označuje počet překročení rozhodující hranice gradientu magnetického pole.

Tab. 6.1: Výsledky měření metodou MMM

Lisovaný materiál	Materiál	Úhel/měření			
		0°/1	0°/2	90°/1	90°/2
S355J2G3	X210Cr12	1	5	OK	OK
	60WCrV7	OK	1	2	16
16MnCr5	X210Cr12	1	3	1	3
	60WCrV7	4	4	4	5

Vypovídající hodnota údajů je zकreslena ručním posuvem měřicí sondy, tím mohlo dojít k přejetí místa poruchy.

Závěr tedy zní, že materiál nástroje X210Cr12, který tvářel S355J2G3 nevykazoval kolmo na směr na značení nástroje žádné trhliny, pro obě měření. Bohužel kolmo na značení nástroje se již pravděpodobně trhliny vyskytovaly. Výsledky zde byly nejlepší ze všech zkoumaných nástrojů. U ostatních kombinací nástrojů se trhliny vyskytovaly, a situace se s dalšími cykly tváření zhoršovala. Tato metoda měření je vhodná pouze pro diagnostické účely.

## 6.8 Shrnutí

Byl navržen experiment, a metody jak zpracovat získaná data. Z realizovaného experimentu se stanovily hodnoty opotřebení a jejich vztah k numerickému modelu. Vyvrátila se vhodnost použití termokamery pro zjišťování teplot polotovaru a navrhla se jiná možnost jak měřit teplotu na povrchu tvářeného polotovaru. Při ověřování teploty se porovnávaly dva numerické modely z různých verzí výpočetního softwaru. Nástroje byly také měřeny metodou MMM, tato metoda nebyla doporučena pro hodnocení opotřebení nástrojů. Vyvrátil jsem také možnost určování stupně opotřebení na základě dosahovaných sil při tváření. Při počtu odlisovaných vzorků během experimentu a opotřebení dosažených na funkčních plochách nástroje, nebyla nalezena spojitost. Ta by ale mohla být prokázána při větším opotřebení / větším počtu odlisovaných vzorků.

Přínosem pro praxi je popsání kombinací materiálů a jejich opotřebení při přechování. Lze tak stanovit velikost opotřebení pracovních ploch nástroje pro danou kombinaci. Nedílnou součástí je i vyvrácení stanovení hodnoty opotřebení pomocí numerických výpočtů v programu na principu MKP (metoda konečných prvků). To je zapříčiněno tím, že MKP se zaměřuje na výpočet nástroje pro první tvářený kus. Neumožňuje vyšetření stavu ploch a jednotlivých parametrů v čase, což je pro tento účel stěžejní.

## 6.9 Doporučení

Ze získaných zkušeností z provedeného experimentu a způsobů jeho vyhodnocování, navrhuji některá zlepšení. Ty by měly zpřesnit výsledky.

- Nástroje upravit tak, aby byly vůči sobě vedeny
- Nesmazatelně zaznamenat na každý nástroj jednotlivé roviny pro snadnější orientaci
- Stejný přístup k přepočtům nakloněné roviny
- Úbytek měřit pomocí LSCM s menším rozlišením
- Lisovat minimálně stejný nebo větší objem vzorků stejného materiálu
- Provést měření povrchu před lisováním

- Provést tři, maximálně čtyři měření minimálně po 70 odlisovaných vzorcích
- Tuhé vedení nástrojů vůči sobě
- Měření teplot pomocí dotykových teploměrů

Jako jedno ze stěžejních bodů vidím zajištění vedení nástrojů vůči sobě. To se jeví jako nejproblematictější při vyhodnocování. Také není vhodné provádět velký počet měření, doporučuji tři, maximálně čtyři měření povrchu nástroje, během celého experimentu.

Při dodržení těchto doporučení se dosáhne výrazného zpřesnění získaných dat.

## 7 Přínos pro vědní obor a praxi

Disertační práce přináší do vědního oboru novou metodiku způsobu zjišťování životnosti tvářecích nástrojů.

Disertační práce se zaměřuje na základní způsob tváření – pēchování. V práci je navržen a realizován experiment, který umožní stanovit hodnoty opotřebení a jejich vztah k numerickému modelu. Jsou navrženy opatření, jak zpracovat naměřená data, tyto opatření je možné aplikovat na jakékoliv následující experimenty.

Disertační práce vyvrací vhodnost použití termokamery pro zjišťování teplot polotovaru a navrhuje jiné možnosti jak měřit teplotu na povrchu tvářeného polotovaru. Nedílnou součástí je i porovnání vypočtených teplot ze dvou verzí výpočetního programu.

Jednotlivé nástroje byly měřeny metodou MMM, tato metoda nebyla doporučena pro hodnocení opotřebení nástrojů.

V disertační práci se také vyvrací možnost určování stupně opotřebení na základě dosahovaných sil při tváření. Při počtu odlisovaných vzorků během experimentu a opotřebení dosažených na funkčních plochách nástroje, nebyla nalezena spojitost. Ta by ale mohla být prokázána při větším opotřebení / větším počtu odlisovaných vzorků.

Přínosem pro praxi je popsání kombinací materiálů a jejich opotřebení při pēchování. Lze tak stanovit velikost opotřebení pracovních ploch nástroje pro danou kombinaci a doporučit výměnu či obnovu pracovní části nástroje. Nedílnou součástí je i vyvrácení stanovení hodnoty opotřebení pomocí numerických výpočtů v programu na principu MKP (metoda konečných prvků). To je zapříčiněno tím, že MKP se zaměřuje na výpočet nástroje pro první tvářený kus. Neumožňuje vyšetření stavu ploch a jednotlivých parametrů v čase, což je pro tento účel stěžejní.

## 8 Conclusions

It is necessary to remember that we are not able to create such comprehensive numerical models which would include all variables. We can imitate a considerable part of parameters; unfortunately, the human factor and the surroundings are random. Therefore, the results of the numerical models must be considered with a certain amount of unreliability.

It is important to note that the current systems of calculations like FEM (finite element method) focus on the calculation of the numerical model only for the first formed piece. It does not allow examination of the surface conditions and specific parameters in time - with a higher number of rammed samples, which is crucial for this purpose.

### 8.1 The Evaluation of the Comparison of the Reached Forces in Forming of Materials S355J2G3 and 16MnCr5

This information does not provide us with any relevant data on the conditions of tool working surfaces. If we have a look at the figures and charts of chapter 5.1 herein, it can be seen that the forces change randomly. Therefore, it does not apply that the more worn-out the surface is, the higher force is required. This assumption proved to be false.

Visible force scatterings for unevenly distributed mechanical properties are well noticeable with the material 16MnCr5, which showed cracking. This material features the scattering of the reached forces of approximately 150 kN. In contrast, the material S355J2G3 showed a far smaller scattering of the reached forces; approximately 60 kN.

Based on the scattering of the measured forces, we could come to a conclusion on the homogeneity of the formed semi-finished product.

## 8.2 Evaluation of Decrease Measurement

The sections (profiles) were measured in the axis on the tool marking and perpendicularly to the tool marking. Ideally, when the tools would be guided against each other, their features would be homogenous and the semi-finished products would show the identical mechanical properties throughout their volumes, the found curves would be symmetrical. However, it cannot be achieved in practice. It was not the purpose of the experiment, either.

The quality of tool surface seems to be crucial; its parallelism to get the right values of wear and tear, the resolution of the measuring apparatus, the human operator. The distortion of results is subject to the inaccuracies of calculation methods.

### 8.2.1 The Evaluation of Decrease Measurement for the Tools from Material X210Cr12

The tool material X210Cr12 forming the semi-finished product S355J2G3 features the maximum value of wear and tear:  $-2.776\text{ }\mu\text{m}$ . Each of the measured profiles was shifted and unstable against each other. This caused insufficient rigid guidance of the tools against each other and/or the inaccurately positioned semi-finished product.

The wear and tear value of the tool made of the material X210Cr12 forming the semi-finished product 16MnCr5 reaches the value of  $-2.87\text{ }\mu\text{m}$ . The maximum wear and tear occurred near the centre of the semi-finished product, the tool. Each of the measured profiles was shifted and unstable against each other. This caused insufficient rigid guidance of the tools against each other and/or the inaccurately positioned semi-finished product.

If I focus on chart 5.6 and chart 5.14, they both are very similar. In both, two places with the dominant wear and tear of the tool are formed; these places are near each other. It is possible that there is just an anomaly resulting from the shift of the profiles. This also corresponds with the results from the preliminary scanning, using the microscope LSCM, which shows that the greatest degree of wear and tear is formed in the centre of the semi-finished product.

### **8.2.2 The Evaluation of the Decrease Measurement for the Tools from Material 60WCrV7**

The tool material 60WCrV7 forming the semi-finished product S355J2G3 features the maximum wear and tear value of  $-3.652\text{ }\mu\text{m}$ . Individual measurement curves are mutually shifted and unstable, mainly as to the measurement in the direction on the tool marking. In the perpendicular direction, they do not show such differences. Graf 5.9 is slightly shifted to the right; I attribute it to the insufficient guidance of the tools against each other.

The tool material 60WCrV7 forming the semi-finished product 16MnCr5 reaches the maximum wear and tear value of  $-6.566\text{ }\mu\text{m}$ . The value is almost double compared to the wear and tear for the formed S355J2G3. Looking at chart 5.17, it can be seen that the maximum wear and tear occurs almost in the centre of the investigated area, i.e. in the area, where there is the centre of the semi-finished product.

Chart 5.20 illustrates best the course of the wear and tear values of individual tools. From the chart, it can be concluded that the wear and tear value of the tools made of X210Cr12 would be similar both for the formed material 16MnCr5 and for the material S355J2G3. In contrast, the wear and tear value for the tool made of the material 60WCrV7 would be far greater for the forming of 16MnCr5. S355J2G3 will wear out the tool less.

## **8.3 Evaluation of the LSCM Data**

### **8.3.1 Evaluation of the Images**

The connected images capture the tool centre, i.e. the unworn surface as well as the surface subject to wear and tear. The connected images show the traces of grinding, individual directions of material movement, various scratches... They are not crucial for the actual evaluation of durability. In the detail view, the uneven lighting of the captured areas as well as the blur of images can be made out. The connected images are illustrative only.



### **8.3.2 Evaluation of Charts**

The data processing for the purpose of obtaining the detailed course of wear and tear is very time-consuming and computing-demanding and it seems to be ineffective currently. The measurement with the identical device, but with a smaller resolution, is much more advantageous. Unfortunately, the topology was not possible to be measured in the experiment. The LSCM measurement was performed only after the end and with a certain time lag. Meanwhile, some corrosion products occurred on the surface; therefore, the predicative capability of the measurement is limited.

## **8.4 The Evaluation of the Tool Images from the Stereoscopic Microscope**

These images are illustrative only. They do not contain any information utilisable for the determination of wear and tear. The images were captured by the third party; therefore, the orientation of the scanned plate cannot be determined.

### **8.4.1 For the Tools Made of X210Cr12**

The traces of formed semi-finished products are clearly visible. For the material of the semi-finished product S355J2G3, the traces after forming are more visible than after forming the semi-finished products from 16MnCr5. Traces - the ridges are longer for the material S355J2G3. The movements of the folded material are clearly visible. This could be caused by the insufficient guidance of the tools against each other, and/or by the inhomogeneity of the formed semi-finished products.

#### **8.4.2 For the Tools 60WCrV7**

For the material of the semi-finished product S355J2G3, the traces after forming are more visible than after forming the semi-finished products from 16MnCr5. The movements of the formed material are also visible; it carves out ridges into the tool. Traces - the ridges are longer, like in the previous example, for the material S355J2G3. This could be caused by the insufficient guidance of the tools against each other, and/or by the inhomogeneity of the formed semi-finished products.

### **8.5 Evaluation of Numerical Model Data**

The numerical model reflects the condition only for the first formed piece. First, the compression wear and tear model will prevail; then the combination of the traction and compression model. Although wear and tear near the edge of the semi-finished product is assumed for all tool materials, according to the numerical model, the measured wear and tear is the greatest in the tool centre. This corresponds to the distribution of the effective stress in the tool.

The wear and tear for the tools forming the semi-finished product from the S355J2G3 material is relatively symmetrical; it features the circular shape. In contrast, for the tools forming the 16MnCr5 material, it is not symmetrical.

The distribution of the effective stress in all tools is maximum in the tool centre; it decreases towards the pressure edges. The stress is distributed symmetrically.

The value of wear and tear cannot be determined according to the result of the numerical modelling, as it does not reflect the condition resulting from a higher number of pressed samples.

## **8.6 The Temperature Difference of the Numeric Modelling Results and Process**

In the analysis of the values obtained within the temperature measurement of test cylinders and the numerical model, we found out the difference of approximately  $100\div 150$  °C. I attribute this significant difference to the computing limitations of the computing software, where some process aspects, such as non-linear course of deformation velocity, change in the area dissipating heat to the surrounding and/or air flow, were not considered.

The data from the thermal camera are affected not only by its settings, but also the limits of the measurement. The individual layers dissipating heat differently probably occur on the semi-finished product during the forming operation. It is therefore preferable to verify the temperature, using contact sensors.

The secondary finding consists in learning that the newer versions of the computing software achieve more credible results, compared to the obtained data. I believe that the higher accuracy of the newer version of the computing software is the result of refining the material properties in the material database of the software.

## **8.7 Evaluation of the MMM Results**

The method of Metal Magnetic Memory was used for the measurement of two pairs of tools. The measurement was carried out after 50 pressed samples (measurement 1, sets 1 and 2) and after 190 samples (measurement 2, set 1) or 230 samples (measurement 2, set 2).

The obtained data are detailed in tab. 8.1. The tools, where no magnetic field gradient exceeding was found out, are marked green; the tools, for which the gradient was exceeded - which poses the risk of crack occurrence, are marked red. The OK labelling means the same as the green marking, i.e. no magnetic field exceeding, and probably no tool failure occurs here. The numeric value indicates the number of excesses of the critical limits of the magnetic field gradient.

Tab. 8.1: The Results of the Measurement using the MMM Method

Pressed material	Material	Angle/Measurement			
		0°/1	0°/2	90°/1	90°/2
S355J2G3	X210Cr12	1	5	OK	OK
	60WCrV7	OK	1	2	16
16MnCr5	X210Cr12	1	3	1	3
	60WCrV7	4	4	4	5

The predictive value of the data is distorted due to the manual shift of the measuring probe; thus the failure spot could have been missed.

It can be concluded that the tool material X210Cr12 forming S355J2G3 did not show any cracks perpendicularly to the direction to the tool marking; it applies to both the measurements. Unfortunately, the cracks probably occurred perpendicularly to the tool marking. The results here were the best of all examined tools. Other tool combinations showed cracks and the situation got worse with the other forming cycles. This measurement method is fit only for diagnostic purposes.

## 8.8 Summary

The experiment and methods to process the obtained data was drawn up. The wear and tear values and their relationship to the numerical model were determined from the performed experiment. The suitability of the use of thermal camera to detect the temperatures of the semi-finished products was refuted and a different method of temperature measurement on the surface of the formed semi-finished product was drawn up. Two numerical models from various versions of the computing software were compared during the temperature verification. The tools were also measured by the MMM method; this method was not recommended for the evaluation of the tool wear and tear. I also refuted the possibility of determining the wear and tear degree on the basis of the reached forces during the forming operation. No relationship was found out between the number of pressed samples in the experiment and the wear and tear on the

functional surfaces of the tool. However, it could be demonstrated with greater wear and tear / a higher number of pressed samples.

The benefit for the practice is the description of the material combinations and their wear and tear in ramming. The degree of wear and tear of the tool working surfaces for the specific combination can be specified. The refutation of the wear and tear value determination using the numerical calculation with the software of the FEM principle (finite element method) is an integral part hereof. This is due to the fact that FEM focuses on the tool calculation for the first formed piece. It does not allow the examination of the conditions of surfaces and individual parameters in time, which is crucial for this purpose.

## 8.9 Recommendation

I suggest some improvements based on the obtained experience with the performed experiment and methods of its evaluation. They should refine the results.

- Adjust the tools, so that they are guided against each other.
- Record individual planes for easier recognition indelibly on each tool.
- The same approach to the calculations of the oblique plane.
- Measure the decrease, using LSCM with a smaller resolution.
- Press at least the same or greater volume of samples of the identical material.
- Measure the surface prior to pressing.
- Perform three, maximum four measurements after at least 70 pressed samples.
- Rigid guidance of tools against each other.
- Temperature measurement using contact thermometers.

I believe that one of the key points is ensuring the tool guidance against each other. This seems to be the most demanding issue in the evaluation. It is not appropriate to perform a high number of measurements; I recommend three, max. four measurements of the tool surface throughout the experiment.

Following these recommendations, the obtained data will be refined significantly.

## 9 Contribution to scientific discipline and practice

The thesis brings a new methodology of detecting the durability of forming tools to the branch of science.

The thesis focuses on the basic method of forming - ramming. In the thesis, an experiment allowing the determination of the wear and tear value and its relationship to the numerical model is drawn up and implemented. The measures to process the measurement data are drawn up; these measures can be applied to any of the following experiments.

The thesis refutes the usability of the thermal camera to determine the semi-finished product temperature and it suggests other ways to measure the temperature on the surface of the semi-finished product subject to the forming process. The comparison of the calculated temperatures, using the two versions of the computing software, is an integral part hereof.

Individual tools were measured with the MMM method; this method was not recommended for the evaluation of the tool wear and tear.

In the dissertation thesis, the possibility of wear and tear degree determination based on the forces reached in forming operation is also refuted. No relationship between the number of pressed samples and the wear and tear of the tool functional surfaces in the experiment was found out. However, it could be demonstrated with greater wear and tear / a higher number of pressed samples.

The benefit for the practice is the description of the material combinations and their wear and tear in ramming. Thus the wear and tear degree of the tool working surfaces for the specific combination can be determined and the replacement or regeneration of the tool working part can be recommended. The refutation of the determination of the wear and tear value using the numerical calculations with the software based on the FEM (finite element method) principle is an integral part hereof. This is due to the fact that FEM focuses on the tool calculation for the first formed piece. It does not allow the examination of the conditions of surfaces and individual parameters in time, which is crucial for this purpose.

## 10 Seznam použité literatury

- [1] VALOVÁ, M. *Využití povlakování při snižování opotřebení tvářecích nástrojů*. X. Celoštátní konferencia doktorandov strojnických fakúlt technických univerzít a vysokých škôl s medzinárodnou účasťou, Herľany. 20. 11. 2007. 7 s. [cit. 2011-04-10]. [online]. URL: <<http://www.sjf.tuke.sk/novus/papers/624-630.pdf>>
- [2] SAILESH, B.; DILMAR, R.; RAJIV, S.; *Material and Surface Engineering For Precision Forging Dies*. Prepared for Precision Forging Consortium Ohio Aerospace Institute and National Center for Manufacturing Science. The Ohio State University, 1999
- [3] ADÁMKOVÁ, L., *P10: Vliv středního napětí na mez únavy (smyčkové diagramy), mez únavy těles s vruby, vliv víceosé napjatosti*. [cit. 2011-04-22]. 14 s. [online] URL:<<http://www.339.vsb.cz/UM/Prednasky/prednaska10.pdf>>
- [4] LANGE, K.; CER, L.; GIEGER, M.; KALS, J. A. G.: J. A. G.: CIPR Ann., 41-2 (1992), 667 s.
- [5] VONDRÁK, M. *Pevnost a životnost I*. Praha: ČVUT, 1987, 201 s.
- [6] MAŠEK, B.; et al. *Využitelnost termomechanického zpracování v kovárenství - 2* in: 4. kovárenská konference, Svaz kováren České Republiky, Brno, 27. - 28. 5. 2003 [cit. 2011-05-06]. 6 s. [online] URL: <[http://home.zcu.cz/~masekb/Prednasky%20na%20konferencich%20pdf/2003/Kovarenska%202003/Konference%20SKCR2003\\_cast2.pdf](http://home.zcu.cz/~masekb/Prednasky%20na%20konferencich%20pdf/2003/Kovarenska%202003/Konference%20SKCR2003_cast2.pdf)>
- [7] RŮŽIČKA, M.; HANKE, M.; ROST, M. *Dynamická pevnost a životnost*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1987. 212 s.
- [8] SEDLÁČEK, V.; et al. *Zotavení a rekrytalizace*. 1. vyd. Praha: Academia, 1985. 280 s.
- [9] PLUHAŘ, J.; et al. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*. Praha: SNTL/Alfa, 1987. 420 s.
- [10] BIBA, N.; STEBUNOV, S.; MUTINGA, H. *Increasing of Tool Life in Cold Forging by Means of FEM Simulation*. In *International Conference «New Developments in Forging Technology» in Fillbach*. Germany, 2005, ISBN 3-88355-342-5.

- [11] PRIKNER, O.; SALABOVÁ, P. *Tepelné zpracování kovů*. In 22nd International Conference on Heat Treatment. Praha: Asociace pro tepelné zpracování kovů ECOSOND s.r.o., 2008, ISBN 978-80-254-3067-5
- [12] MORAVEC, V.; PIŠTÁČEK, D. *Pevnost a životnost dynamicky namáhaných strojních součástí*. VŠB- TUO 2006. 100 s., 1. vydání, ISBN 80-248-0980-X
- [13] RŮŽIČKA, M. Kritéria a postupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí. 1998. [cit. 2011-04-19]. [online] URL: <[http://mechanika2.fs.cvut.cz/sources\\_old/pzk/](http://mechanika2.fs.cvut.cz/sources_old/pzk/)>
- [14] RUŽIČKA, M.; HAVLÍČEK, V. *Stavba a provoz strojů 118 - Výpočet strojních částí na únavu za normálních a zvýšených teplot I*. Praha: Dům techniky ČSVTS, 1988
- [15] KALÁB, K. *Návrh a výpočet dynamicky namáhaného šroubu*. VŠB-TUO, 2009, 23 s.
- [16] BORŮVKA, O.; POHL, R. *Dynamická pevnost' a únavová životnost' (návod na cvičenia)*. Žilina: VŠDS, 1986. 193 s.
- [17] KALLURI, S.; BONACUSE, P. J. *Multiaxial fatigue and deformation testing techniques*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 1996. 309 s. ISBN: 978-0-8031-2045-7
- [18] POHL, A.; POHL, R. *Dynamická pevnost' a únavová životnost'*. Bratislava: Alfa, 1988. 308 s.
- [19] SURESH, S. *Fatigue of materials*. Cambridge: University Press, 1998, 2 vyd. 683 s. ISBN: 0-251-57847-7
- [20] HUŤAŘ, P.; NÁHLÍK, L. *Úvod do únavového poškození*. 11.4.2008 56 s. [cit. 2011-05-10]. [online]. URL: <<http://hutar.wz.cz/lomovka/04.pdf>>
- [21] POVÝŠIL, J.; BOŘUTA, J.; HRUBÝ, J.; PETRUŽELKA, J.; RENTKA, J. *Tváritelnost nástrojové oceli 19559 za tepla hodnocená krutovou zkouškou a dynamickým materiálovým modelováním: předběžné výsledky, 1. část*. Strojírenská technologie: časopis pro vědu, výzkum a výrobu. 2010, roč. XV, č. 4, s. 47-53. ISSN 1211-4162
- [22] POVÝŠIL, J.; BOŘUTA, J.; HRUBÝ, J.; PETRUŽELKA, J.; RENTKA, J. *Tváritelnost nástrojové oceli 19559 za tepla hodnocená krutovou zkouškou a dynamickým materiálovým modelováním: předběžné výsledky, 2. část*.



- Strojírenská technologie: časopis pro vědu, výzkum a výrobu. 2011, roč. XVI, č. 1, s. 28-36. ISSN 1211-4162
- [23] Fluke Ti55 Industrial-Commercial Thermal Imager [online]. 2. 2. 2013, dostupné z: <<http://teplovizo.ru/photo/fluke/fluke-ti55.jpg>>
- [24] Uživatelská příručka Ti55 Fluke corporation. [ online ]. 2. 2. 2013, dostupné z: <[http://assets.fluke.com/manuals/flexcam\\_umeng0200.pdf](http://assets.fluke.com/manuals/flexcam_umeng0200.pdf)>
- [25] Preditest – Predikce – Diagnostika – Testování [ online ]. 16. 1. 2013, dostupné z: <<http://preditest.cz/epe/download.php?m=content&i=399&f=Preditest-MMM.pdf>>
- [26] MMM System - NDT and Diagnostics System. Energodiagnostika Co. Ltd. Testers of Stress Concentration TSC-3M-12 Energodiagnostika Co. Ltd. [online]. 1. 2. 2013, dostupné z: <<http://www.mmmsystem.com/pages/tsc3m.htm>>
- [27] C1208 – Mahr Metrology [online] 1. 6. 2013, dostupné z: <<http://www.mahr.de/index.php?NodeID=11534>>
- [28] Induktivní měřicí snímače Millimar série P2000 [online] 1. 6. 2013, dostupné z: <<http://www.mahr.com/scripts/relocateFile.php?ContentID=5649&NodeID=11011&FileID=11388&ContentDataID=22964&save=0>>
- [29] Programování na zakázku - testování materiálu | RechbergNET s.r.o. [online] 1. 6. 2013, dostupné z: <<http://www.rechberg.net/reference-programovani-na-zakazku-tempos>>
- [30] NĚMEC, J.; *Tuhost a pevnost ocelových součástí*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd 1963. 2nd ed. 771 pp.
- [31] *ASM Handbook, Vol. 19, Fatigue and fraction*. ASM International. 1996. Product Code 06197G. ISBN 0-87170-385-8, 341 p.
- [32] ESPER, F. J.; SONSONIO, C. M.; *Fatigue Design for PM Components*. European Powder Metallurgy Association. Shrewsbury, UK 1997
- [33] ESPER, F. J.; SONSONIO, C. M.; *Fatigue Design for PM Components*. European Powder Metallurgy Association. Shrewsbury, UK 1997
- [34] KNOERR, M.; LANGE, K.; ALTAN, T.; *Fatigue failure of cold forging tooling: causes and possible solutions through fatigue analysis*. J. Mater. Process. Technol., 1994, Vol. 46, Issue 1-2, pp 57-71, ISSN 0924-0136

- [35] FALK, B.; ENGEL, U.; GEIGER, M.; Estimation of tool life in bulk metal forming based on different failure concepts. *J. Mater. Process. Technol.*, 1998, Vol. 80–81, pp 602-607, ISSN 0924-0136
- [36] LEE, Y. Ch.; CHEN, F. K.; Fatigue life of cold-forging dies with various values of hardness. *J. Mater. Process. Technol.*, 2001, Vol. 113, pp 539-543, ISSN 0924-0136
- [37] SAROOSH, M. A.; LEE, H.-C.; IM, Y.-T.; CHOI, S.-W.; LEE, D.-L.; High cycle fatigue life prediction of cold forging tools based on work piece material property. *J. Mater. Process. Technol.*, 2007, Vol. 191, pp 178-181, ISSN 0924-0136
- [38] LEE, H.-C.; LEE, Y.; LEE, S.-Y.; CHOI, S.; LEE D.-L.; IM, Y.-T.; Tool life prediction for the bolt forming process based on high-cycle fatigue and wear. *J. Mater. Process. Technol.*, 2008, Vol. 201, pp 348-353, ISSN 0924-0136
- [39] LEE, G.-A.; IM, Y.-T.; Finite-element investigation of the wear and elastic deformation of dies in metal forming. *J. Mater. Process. Technol.*, 1999, Vol. 89–90, pp 123-127, ISSN 0924-0136
- [40] JASIONOWSKI, R.; PODREZ-RADZISZEWSKA, M.; ZASADA, D.; *Cavitation erosion resistance of the chosen aluminum alloys*. Manufacturing Technology, 2011, Vol. 11, No. 11, pp. 22-28, ISSN 1213-2489
- [41] ČUBAN, J.; CALONIUS O.; PIETOLA, M.; JERSÁK J.; *Fatigue life and surface integrity measurements of EN S355J2 steel used in hydraulic components*. Manufacturing Technology, 2011, Vol. 11, No. 11, pp. 5-11, ISSN 1213-2489
- [42] NĚMEC, J.; *Tuhost a pevnost ocelových součástí*. Československá akademie věd, Praha, 1963, 771s
- [43] FAMFULÍK J., MÍKOVÁ J., KRZYŽÁNEK R.. *Opotřebení strojních soustav a vznik poruch*. Teorie údržby. [online]. 2007 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TU/TU/>
- [44] HRUBÝ, J.; RENTKA, J.; SCHINDLEROVÁ, V.; KREJČÍ, L.; ŠEVČÍKOVÁ, X. *Possibilities of prediction of service life of forming tools*. Manufacturing Technology, June 2013, Vol. 13, No. 2, s. 178-181, ISSN 1213-2489

## 11 Seznam vlastních publikací

- [1] HRUBÝ, J.; RENTKA, J.; SCHINDLEROVÁ, V.; KREJČÍ, L.; ŠEVČÍKOVÁ, X. *Possibilities of prediction of service life of forming tools*. Manufacturing Technology, June 2013, Vol. 13, No. 2, s. 178-181, ISSN 1213-2489
- [2] HRUBÝ, J.; SCHINDLEROVÁ, V.; RENTKA, J. Degradation processes in the contact layers of forming tools. *Manufacturing Technology*, 2015, Vol. 15, No. 5, pp. 836-842, ISSN 1213-2489.
- [3] POVÝŠIL, J., BOŘUTA, J., HRUBÝ, J., PETRUŽELKA, J., RENTKA, J. *Tvařitelnost nástrojové oceli 19559 za tepla hodnocená krutovou zkouškou a dynamickým materiálovým modelováním: předběžné výsledky, 2. část*. Strojírenská technologie: časopis pro vědu, výzkum a výrobu. 2011, roč. XVI, č. 1, s. 28-36. ISSN 1211-4162.
- [4] POVÝŠIL, J., BOŘUTA, J., HRUBÝ, J., PETRUŽELKA, J., RENTKA, J. *Tvařitelnost nástrojové oceli 19559 za tepla hodnocená krutovou zkouškou a dynamickým materiálovým modelováním: předběžné výsledky, 1. část*. Strojírenská technologie: časopis pro vědu, výzkum a výrobu. 2010, roč. XV, č. 4, s. 47-53. ISSN 1211-4162.

## 12 Seznam obrázků, grafů a tabulek

### 12.1 Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Nejčastější typy opotřebení [2] .....	14
Obrázek 2.2: Procentuální výskyt typických poruch tvářecích nástrojů [2] .....	15
Obrázek 2.3: Schématické znázornění druhů opotřebení a jejich tvorba [43] .....	16
Obrázek 2.4: Detail mechanismu adhezivního opotřebení [43] .....	17
Obrázek 2.5: Schéma vlivů na životnost materiálu nástrojů [7] .....	19
Obrázek 2.6: Druhy zatěžování nástroje [12] .....	21
Obrázek 2.7: Popis kmitu cyklu [7] .....	22
Obrázek 2.8: Rozlišení nesymetrie cyklu [7][12] .....	23
Obrázek 2.9: Haighův diagram [7][12] .....	24
Obrázek 2.10: Diagram pro určení koeficientu povrchu [15] .....	26
Obrázek 2.11: Diagram pro určení koeficientu velikosti součásti [15] .....	27
Obrázek 2.12: Zjednodušený Haighův diagram [7] .....	27
Obrázek 2.13: Smithův smyčkový diagram [7] .....	28
Obrázek 2.14: Porovnání mezních křivek dle různých autorů [2][7][12] .....	30
Obrázek 2.15: Pole efektivního napětí kovací zápustky v okamžiku maxima zatížení [44] .....	31
Obrázek 2.16: Expozice faktoru opotřebení kovací zápustky ve finální poloze [44] .....	33
Obrázek 2.17: Rozložení kontaktního tlaku v dutině kovací zápustky při maximu zatížení [44] .....	35
Obrázek 2.18: Rozložení tlaku na kontaktní ploše pracovního válce [44] .....	36
Obrázek 2.19: Varianty Goodmannovy linie pracovního válce dle cyklického zatěžování [44] .....	37
Obrázek 4.1: Celkový pohled na kombinovaný hydraulický lis ZD 40 .....	39
Obrázek 4.2: Detail ovládacího pultu .....	40
Obrázek 4.3: Definice nové zkoušky a její nastavení [29] .....	41
Obrázek 4.4: Bližší pohled na mechanismus, ve kterém bude umístěn nástroj .....	42
Obrázek 4.5: Okótovaný rozměr vzorků .....	47
Obrázek 4.6: Vzorek před a po tváření z materiálu 16MnCr5 .....	48
Obrázek 4.7: Vzorek před a po tváření z materiálu S355J2G3 .....	49

Obrázek 4.8: Termokamera Fluke Ti55 [23] .....	50
Obrázek 4.9: Demontovaná sonda při měření .....	52
Obrázek 4.10: Ukázka dobrého magnetografu svarového spoje [25] .....	52
Obrázek 4.11: Vyhodnocovací zařízení TSC-3M-12.....	53
Obrázek 4.12: Měřicí řetězec při snímání, na obrázku měřicí sonda P2004.....	54
Obrázek 4.13: Mahr Millimar C1208.....	55
Obrázek 4.14: Orientace naměřených hodnot .....	56
Obrázek 4.15: Celkový pohled na sestavu měření úbytků povrchových vrstev .....	57
Obrázek 4.16: Schématický náčrt problému .....	58
Obrázek 4.17: Zjednodušený nákres problematiky přepočtu pomocí trigonometrických funkcí.....	59
Obrázek 4.18: Detailní pohled na trigonometrický problém přepočtu.....	61
Obrázek 4.19: Nákres problematiky přepočtu pomocí poměrů .....	62
Obrázek 4.20: Detailní pohled na přepočet pomocí poměrů.....	63
Obrázek 4.21: Schéma spojování dat .....	66
Obrázek 5.1: Lisovaný materiál 16MnCr5, vzorek 1 ÷ 10.....	69
Obrázek 5.2: Lisovaný materiál 16MnCr5, vzorek 221 ÷ 225.....	70
Obrázek 5.3: Lisovaný materiál S355J2G3, vzorek 1 ÷ 10 .....	70
Obrázek 5.4: Lisovaný materiál S355J2G3, vzorek 181 ÷ 190 .....	71
Obrázek 5.5: Průběh sil při tváření S355J2G3, data průměrované, polynomy 6tého řádu .....	72
Obrázek 5.6: Průběh sil při tváření 16MnCr5, data průměrované, polynomy 6tého řádu .....	72
Obrázek 5.7: Snímek opotřebované plochy nástroje X210Cr12, lisován materiál S355J2G3 .....	94
Obrázek 5.8: Snímek opotřebované plochy nástroje X210Cr12, kde je lisován materiál 16MnCr5 .....	95
Obrázek 5.9: Snímek opotřebované plochy nástroje 60WCrV7, lisován materiál S355J2G3 .....	96
Obrázek 5.10: Snímek opotřebované plochy nástroje 60WCrV7, lisován 16MnCr5 .....	97
Obrázek 5.11: X210Cr12 (-1_H ch1).....	98
Obrázek 5.12: X210Cr12 (-2_H ch1).....	98
Obrázek 5.13: 60WCrV7 (-1_H ch1).....	98

Obrázek 5.14: 60WCrV7 (-2_H ch1).....	98
Obrázek 5.15: Detail nevyváženosti osvětelní snímků .....	99
Obrázek 5.16: X210Cr12 (-1_V ch1).....	100
Obrázek 5.17: X210Cr12 (-2_V ch1).....	100
Obrázek 5.18: 60WCrV7 (-1_V ch1).....	101
Obrázek 5.19: 60WCrV7 (-2_V ch1).....	101
Obrázek 5.20: Zpracovaný snímek z LSCM s nižším rozlišením.....	103
Obrázek 5.21: Porovnání výsledků pressure runout materiálu 60WCrV7 a X210Cr12 při tváření S355J2G3 .....	104
Obrázek 5.22: Porovnání výsledků traction runout materiálu 60WCrV7 a X210Cr12 při tváření S355J2G3 .....	105
Obrázek 5.23: Porovnání výsledků stress eff. materiálu 60WCrV7 a X210Cr12 při tváření S355J2G3 .....	106
Obrázek 5.24: Porovnání výsledků pressure runout materiálu 60WCrV7a X210Cr12 při tváření 16MnCr5 .....	107
Obrázek 5.25: Porovnání výsledků traction runout materiálu 60WCrV7a X210Cr12 při tváření 16MnCr5 .....	108
Obrázek 5.26: Porovnání výsledků stress eff. materiálu 60WCrV7 a X210Cr12 při tváření 16MnCr5 .....	109
Obrázek 5.27: Porovnání teplot numerického modelu a reálného procesu na materiálu S355J2G3 .....	113
Obrázek 5.28: Porovnání teplot numerického modelu a reálného procesu na materiálu 16MnCr5 .....	114
Obrázek 5.29: Nástroj z materiálu X210Cr12, lisován materiál S355J2G3, porovnání měření po 50 ks a 190 ks .....	115
Obrázek 5.30: Nástroj z materiálu X210Cr12, lisován 16MnCr5, porovnání měření po 50 ks a 230 ks .....	116
Obrázek 5.31: Nástroj z materiálu 60WCrV7, lisován materiál S355J2G3, porovnání měření po 50 ks a 190 ks .....	118
Obrázek 5.32: Nástroj z materiálu 60WCrV7, lisován 16MnCr5, porovnání měření po 50 ks a 230 ks .....	119

## 12.2 Seznam grafů

Graf 5.1: Nezpracovaná změřená data nástroje X210Cr12 lisující S355J2G3, naměřeno po odlisování prvních 10 ks	68
Graf 5.2: Dosahovaná síla při konstantní vzdálenosti, tvářený materiál 16MnCr5	73
Graf 5.3: Dosahovaná síla při konstantní vzdálenosti, tvářený materiál S355J2G3	74
Graf 5.4: Graf vývoje topologie povrchu X210Cr12 (-1-00) během lisování materiálu S355J2G3 rovnoběžně se značením	75
Graf 5.5: Graf vývoje topologie povrchu X210Cr12 (-1-90) během lisování materiálu S355J2G3 kolmo na značení	76
Graf 5.6: Sjedený vývoj povrchu nástroje z X210Cr12 při tváření S355J2G3	78
Graf 5.7: Graf vývoje topologie povrchu 60WCrV7 (-1-00) během lisování materiálu S355J2G3 rovnoběžně s značením	79
Graf 5.8: Graf vývoje topologie povrchu 60WCrV7 (-1-90) během lisování materiálu S355J2G3 kolmo na značení	80
Graf 5.9: Sjedený vývoj povrchu nástroje z 60WCrV7 při tváření S355J2G3	82
Graf 5.10: Graf maximálních naměřených úbytků povrchových vrstev pro materiál X210Cr12 lisován materiál S355J2G3	83
Graf 5.11: Graf maximálních naměřených úbytků povrchových vrstev pro materiál 60WCrV7, lisován materiál S355J2G3	83
Graf 5.12: Graf vývoje topologie povrchu X210Cr12 (-2-00) během lisování materiálu 16MnCr5 rovnoběžně s značením	84
Graf 5.13: Graf vývoje topologie povrchu X210Cr12 (-2-90) během lisování materiálu 16MnCr5 kolmo na značení	85
Graf 5.14: Sjedený vývoj povrchu nástroje z X210Cr12 při tváření 16MnCr5	87
Graf 5.15: Graf vývoje topologie povrchu 60WCrV7 (-2-00) během lisování materiálu 16MnCr5 rovnoběžně s značením	88
Graf 5.16: Graf vývoje topologie povrchu 60WCrV7 (-2-90) během lisování materiálu 16MnCr5 kolmo na značení	89
Graf 5.17: Sjedený vývoj povrchu nástroje z 60WCrV7 při tváření 16MnCr5	91
Graf 5.18: Graf maximálních naměřených úbytků povrchových vrstev pro materiál nástroje X210Cr12, lisován polotovár 16MnCr5	92

---

Graf 5.19: Graf maximálních naměřených úbytků povrchových vrstev pro materiál 60WCrV7, lisován polotovar 16MnCr5	92
Graf 5.20: Teoretický průběh opotřebení	93
Graf 5.21: Graf z dat získaných metodou LSCM pro X210Cr12 (-1-H)	102
Graf 5.22: Detail měření z LSCM	103
Graf 5.23: Detail vývoje opotřebení pro tvářený materiál S355J2G3	111
Graf 5.24: Detail vývoje opotřebení pro tvářený materiál 16MnCr5	111

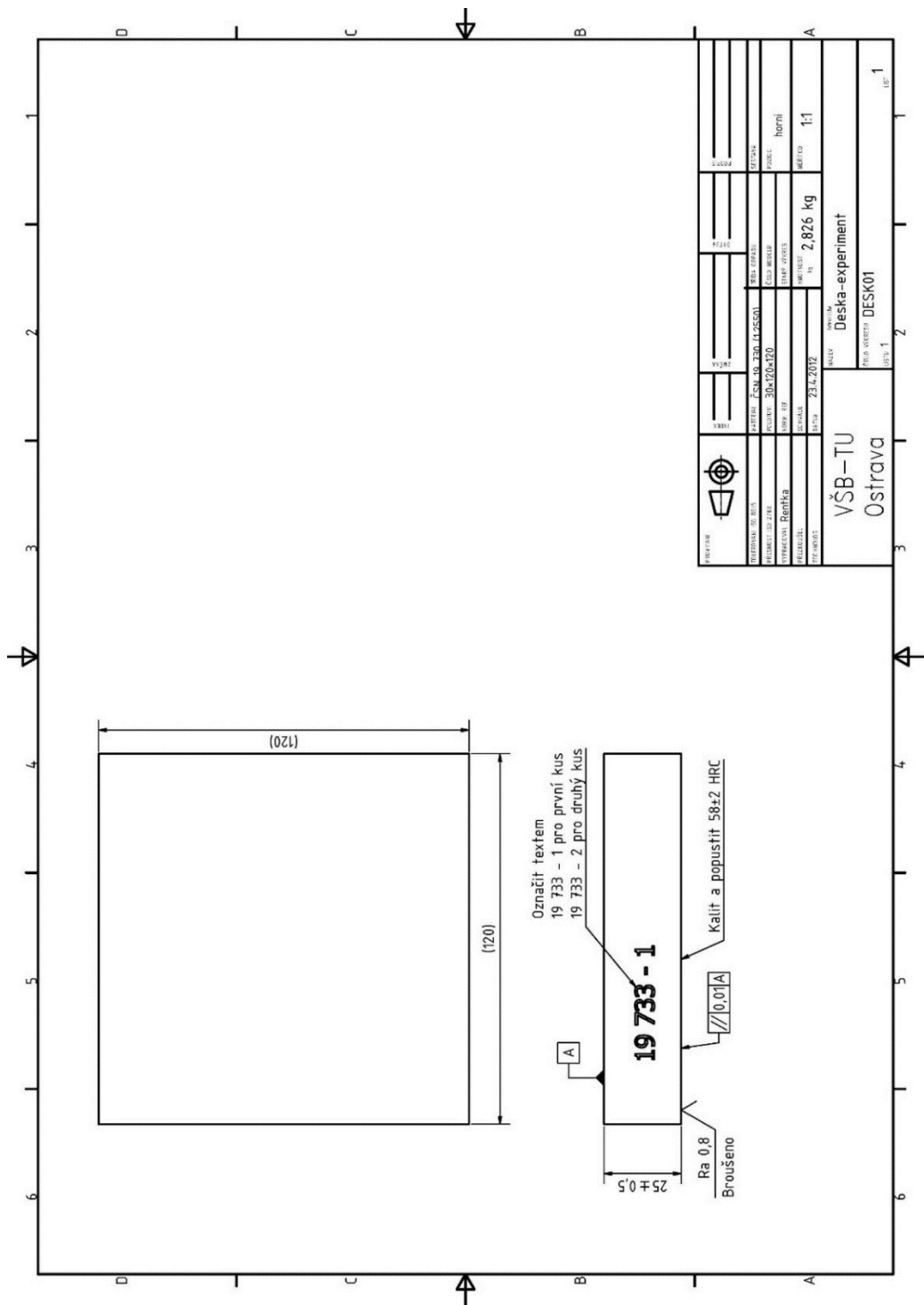


## 12.3 Seznam tabulek

Tab. 4.1: Chemické složení materiálu nástroje X210Cr12	43
Tab. 4.2: Ekvivalenty ve světě	43
Tab. 4.3: Chemické složení materiálu nástroje 60WCrV7	44
Tab. 4.4: Ekvivalenty ve světě	44
Tab. 4.5: Chemické složení tvářeného materiálu 16MnCr5	45
Tab. 4.6: Ekvivalenty ve světě	45
Tab. 4.7: Chemické složení tvářeného materiálu S355J2G3	49
Tab. 4.8: Charakteristika lineární odchylky měřicí sondy P2004	57
Tab. 5.1: Přehled sestav nástrojů	67
Tab. 5.2: Přehled hodnot opotřebení	110
Tab. 6.1: Výsledky měření metodou MMM	126
Tab. 8.1: The Results of the Measurement using the MMM Method	136

13 Přílohy

13.1 Výkres nástroje z materiálu 60WCrV7



### 13.2 Výkres nástroje z materiálu X210Cr12

